

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

ANALYSE DU COMPORTEMENT THERMIQUE DES SURFACES À L'AIDE DE
L'IMAGERIE AÉROPORTÉE INFRAROUGE THERMIQUE (TABI-1800) ET
HYPERSPÉCTRALE (CASI-1500) DANS L'OPTIQUE DE MINIMISER
L'INTENSITÉ DES ÎLOTS DE CHALEUR URBAINS SUR L'ÎLE DE
MONTRÉAL

MÉMOIRE

PRÉSENTÉ

COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN GÉOGRAPHIE

PAR

OLIVIER CANUEL OUELLET

MAI 2017

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL
Service des bibliothèques

Avertissement

La diffusion de ce mémoire se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire *Autorisation de reproduire et de diffuser un travail de recherche de cycles supérieurs* (SDU-522 – Rév.07-2011). Cette autorisation stipule que «conformément à l'article 11 du Règlement no 8 des études de cycles supérieurs, [l'auteur] concède à l'Université du Québec à Montréal une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de [son] travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, [l'auteur] autorise l'Université du Québec à Montréal à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de [son] travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de [la] part [de l'auteur] à [ses] droits moraux ni à [ses] droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, [l'auteur] conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont [il] possède un exemplaire.»

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, je tiens à remercier mon directeur de maîtrise, M. Yves Baudouin pour m'avoir offert ce projet de recherche exceptionnel, mais surtout pour son soutien, ses conseils et sa grande patience. Merci d'avoir continué à me faire confiance malgré mes nombreuses difficultés.

Je tiens aussi à remercier M. Mario Bédard pour m'avoir enseigné la signification et le sens de la recherche scientifique tout au long de mes études. À tous mes collègues avec qui j'ai partagé les épreuves, les embuches, mais surtout les bons moments. Merci pour vos conseils et pour votre aide, mais surtout merci d'avoir rendu cette période de ma vie aussi mémorable.

J'aimerais tout particulièrement souligner le travail exceptionnel du personnel de soutien du département de géographie. Merci à André Parent, Hans Asnong, Bertrand Touchette, François Moquin, Vicki Goyette et Suzanne Braz.

Enfin, un merci tout spécial à ma famille, à mes ami-es et ma concubine pour votre support et vos encouragements tout au long de cette épopée.

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES FIGURES.....	vi
LISTE DES TABLEAUX.....	ix
RÉSUMÉ	x
INTRODUCTION	1
CHAPITRE I	
MISE EN CONTEXTE.....	3
1.1 Profil démographique de la région de Montréal	3
1.2 La croissance de l’urbanisation et l’étalement urbain	4
1.3 Les types d’îlots de chaleur urbains et leurs définitions.....	4
1.4 Les changements climatiques et les vagues de chaleur extrême	7
1.5 Les vagues de chaleur et le milieu : un risque de santé majeur	8
1.6 La vulnérabilité à la chaleur : les aînés, les plus à risque	8
1.7 Prises de conscience du risque, les mesures d’atténuation	9
1.9 Le bilan	12
1.10 Problématique et objectifs de recherche	12
1.11 Présentation et description de la zone d’étude.....	13
1.11.1 Localisation et profil sociodémographique.....	13
1.11.2 L’occupation du sol de Mercier–Hochelaga-Maisonneuve	14
1.12 Justification de la sélection de la zone d’étude.....	16
1.12.1 Un échantillon de la ville de Montréal représentatif et varié de l’aménagement du territoire	16
1.12.2 Une morphologie urbaine homogène et peu ombragée	16
1.12.3 Une population particulièrement à risque aux chaleurs extrêmes.....	17
CHAPITRE II	
MÉTHODOLOGIE.....	18

2.1	Méthode d'acquisition et description des données	18
2.1.1	Les survols aéroportés.....	18
2.1.2	Les images hyperspectrales (visibles) et le capteur CASI-1500	20
2.1.3	Les images thermiques et le capteur TABI-1800.....	20
2.1.4	Les conditions météorologiques lors du survol aéroporté.....	21
2.1.5	Traitement des images et corrections atmosphériques	22
2.2	Les traitements et l'extraction des données des images	22
2.2.1	La sélection des images.....	22
2.2.2	La présentation des étapes nécessaires à la réalisation de la cartographie et des traitements statistiques	23
CHAPITRE III		
PRÉSENTATION DES RÉSULTATS		32
3.1	Description des types de surface par l'entremise de la TCP : la cartographie de l'occupation du sol.....	32
3.1.1	Analyse de la carte de la classification supervisée et de l'occupation du sol	32
3.2	Cartographie de l'indice de végétation NDVI.....	35
3.2.1	Répartition de la végétation.....	35
3.3	Présentation des cartes thermiques de jour et de nuit de la zone d'étude.....	37
3.3.1	La cartographie thermique des surfaces de jour	37
3.3.2	Les immeubles et leurs toitures.....	37
3.3.3	Le réseau routier : des rues résidentielles et des artères commerciales ...	38
3.3.4	Les arbres matures et leurs ombres projetées.....	38
3.3.5	Les espaces gazonnés	39
3.4	La cartographie thermique de nuit de surface.....	41
3.4.1	Les immeubles et leurs toitures.....	41
3.4.2	Les surfaces asphaltées.....	41
3.4.3	Les arbres matures.....	42
3.4.4	Les surfaces gazonnées	42
3.5	Évaluation de l'impact de l'albédo des toitures.....	44
3.5.1	Les toits goudronnés à faible albédo	44

3.6.1 Le gazon synthétique g1	54
3.6.2 Le gazon naturel g2	55
3.6.3 Le gazon naturel et irrigué g3	56
3.7.1 L'influence de la végétation NDVI sur les températures de surface de jour	61
3.7.3 La température de surface de jour et la température de surface de nuit...	63
CHAPITRE IV	
ANALYSE DES RÉSULTATS ET DISCUSSION	65
4.1 Comportement thermique diurne des surfaces du milieu urbain	65
4.1.1 Détermination de l'apport de la végétation sur la température de surface à partir de l'indice de végétation NDVI	65
4.1.3 La portée de la fraîcheur des espaces végétalisés	67
4.1.4 Détermination de l'apport des surfaces à haut albédo sur la température de surface	68
4.1.5 Caractérisation et localisation des îlots de chaleur de surface de jour	69
4.1.6 Comportement thermique nocturne des surfaces du milieu urbain.....	71
4.1.7 Caractérisation et localisation des îlots de chaleur de surface de nuit	71
4.2 Recommandations pour l'implantation de mesures d'atténuation selon l'environnement urbain.....	73
4.3 Considérations méthodologiques.....	75
4.3.1 La correction atmosphérique : sous-estimation marquée la nuit.....	75
4.3.2 L'étude des îlots de chaleur de surface à partir de la télédétection : les zones invisibles	77
4.4 L'intérêt des images aéroportées thermiques dans les études des îlots de chaleur.....	77
CONCLUSION	79
BIBLIOGRAPHIE	82

LISTE DES FIGURES

Figure	Page
1.1 Mise en relation de la perte du couvert végétal causée par la création d'un ensemble résidentiel (encerclé) et de l'augmentation de la température de surface dans un secteur de Longueuil entre 1984 et 2005. (Source: Martin, 2008).....	5
1.2 Schématisation des trois types d'îlots de chaleur urbains. Tiré de Lareau-Carpentier, 2012 (traduction de Oke, 1997).	6
1.3 Localisation de l'arrondissement Mercier-Hochelaga-Maisonneuve. (Source : Ville de Montréal, 2014)	13
1.4 Identification des différents secteurs de l'arrondissement Mercier-Hochelaga-Maisonneuve selon l'affectation du sol. (Source: Ville de Montréal, 2004)	14
1.5 Exemple de la répartition de la végétation et de la hauteur homogène des bâtiments dans l'arrondissement. (Source: Google Earth, 2016)	15
1.6 Répartition des parcs et espaces verts de l'arrondissement Mercier-Hochelaga-Maisonneuve. (Source: Ville de Montréal, 2014)	17
2.1 Démarche méthodologique	19
2.2 Variation de la température de l'air et du taux d'humidité relative entre le 31 août et le 2 septembre 2012, station météorologique de l'aéroport int. Pierre-Elliott Trudeau, Montréal. (Source : Environnement Canada, 2012a, 2012b, 2012c).....	21
2.3 Représentation de la signature spectrale d'un pixel de végétation enregistré sur une image CASI-1500. Les lignes rouges indiquent les bandes ayant la plus forte réflectance (bande 44) et la bande ayant la plus faible réflectance dans le spectre du visible (bande 34).....	27
2.4 Localisation de la zone d'échantillonnage (encadré rouge). (Source : image RGB créée à partir de l'image CASI-1500, 1 ^{er} septembre 2012)	28
3.1 Présentation de la classification de l'occupation du sol et de l'image RGB. Les encerclés a. et b. indiquent la confusion de la classification	

	entre les classes « arbres » et « herbe ». Le cercle c. est un exemple l'« ombre » qui est sous-estimée dans les portions à forte concentration d'arbres matures. Les cercles d. et e. sont des cas où les toits blancs n'ont pas été classifiés comme des « surfaces blanches ».	33
3.2	Représentation de la cartographie de l'indice de végétation NDVI et de l'image RGB. L'encadré représente la zone d'extraction utilisée pour l'échantillonnage des données. On remarque que les surfaces dépourvues de végétation sont en rouge. On retrouve en rouge les surfaces non végétales et en vert la végétation.	36
3.3	Cartographie thermique de surface de jour de la zone d'étude localisée dans l'arrondissement Mercier–Hochelaga-Maisonneuve issue du capteur TABI-1800, 1 ^{er} septembre 2012, a) exemple de toitures goudronnées, b) exemple de routes asphaltées, c) exemple d'arbres matures, d) exemple de gazon naturel.....	40
3.4	Cartographie thermique de surface de nuit de la zone d'étude localisée dans l'arrondissement Mercier–Hochelaga-Maisonneuve issue du capteur TABI-1800, 2 septembre 2012, a) et b) exemples de toitures goudronnées, c) exemple de surface asphaltée encadrée partiellement par un bâtiment à l'ouest, d) exemple d'intersection routier, e) exemple d'arbres matures, f) exemple de gazon naturel	43
3.5	Représentation tridimensionnelle des toitures analysées. À noter que la date de la prise d'image qui a servi à la création des bâtiments en 3D, n'est pas exactement la même que celles des aéroportées thermiques de la présente recherche. L'aspect visuel des toitures est légèrement différent de ce qu'il était lors de l'aéroportée. C'est pourquoi ces images sont utilisées uniquement pour mettre en évidence les obstacles qui peuvent entourer les bâtiments. (Source : Google Earth)	51
3.6	Température de surface des toitures durant le jour. Les encadrés verts représentent les toits échantillonnés.	52
3.7	Température de surface des toitures durant la nuit. À noter que les points froids (bleus) dans l'image du toit n3 sont en fait des erreurs de température liée à l'image. Les encadrés verts représentent les toits échantillonnés.	53
3.8	Représentation tridimensionnelle des gazons. g1) Terrain de soccer en gazon artificiel (école secondaire Pierre-Dupuy). g2) Terrain de soccer en gazon naturel (collège de Maisonneuve). g3) Terrain de soccer entretenu (Stade Saputo). À noter que la date de la prise de l'image qui a servi à la création des bâtiments en 3D, n'est pas exactement la même	

	que celles des aéroportées thermiques de la présente recherche. (Source :Google Earth)	58
3.9	Température de surface de jour des surfaces gazonnées. Les encadrés verts sont les zones échantillonnées. g1) Terrain de soccer en gazon artificiel. g2) Terrain de soccer en gazon naturel. g3) Terrain de soccer entretenu (Stade Saputo).	59
3.10	Température de surface de nuit des surfaces gazonnées. Les encadrés verts sont les zones échantillonnées. g1) Terrain de soccer en gazon artificiel. g2) Terrain de soccer en gazon naturel. g3) Terrain de soccer entretenu (Stade Saputo).	60
3.11	Relation entre l'indice de végétation NDVI et la température de surface diurne	62
3.12	Relation entre l'indice de végétation NDVI et la température de surface nocturne	63
3.13	Relation entre la température de surface diurne et la température de surface nocturne	64

LISTE DES TABLEAUX

Tableau	Page
2.1 Répartition de la longueur d'onde centrale ($\pm 7,4 \mu\text{m}$) de chacune des 72 bandes des images générées par le capteur CASI-1500.....	20
3.1 Matrice de confusion de la classification de l'occupation du sol à partir des zones d'entraînement utilisées pour la classification supervisée.....	35
3.2 : Synthèse des valeurs statistiques descriptives des sept toitures investiguées.....	45
3.3 : Tableau synthèse des valeurs statistiques des trois surfaces gazonnées investiguées.....	54

RÉSUMÉ

Lorsque les vagues de chaleur affectent le milieu urbain leur intensité s'avère être amplifiée par l'artificialisation des surfaces et la perte de végétation (l'îlot de chaleur urbain) et deviennent des enjeux sanitaires majeurs pour les personnes les plus démunies de la société. De ce fait, la présente recherche a comme objectif d'améliorer les connaissances sur les îlots de chaleur de surface et plus précisément sur le comportement thermique diurne et nocturne des surfaces dans un secteur résidentiel de l'arrondissement Mercier-Hochelaga-Maisonneuve de la ville de Montréal.

L'objectif principal de cette étude est d'analyser le comportement thermique des surfaces en milieu urbain afin de maximiser l'efficacité des mesures d'atténuation visant à diminuer l'intensité des îlots de chaleur urbains estivaux sur l'île de Montréal. Pour répondre à cet objectif, trois objectifs secondaires sont mis de l'avant soit 1) localiser les îlots de chaleur de surface diurnes et nocturnes, 2) déterminer les facteurs majeurs influençant la température de surface de jour et de nuit, 3) identifier les éléments du cadre bâti responsables des îlots de chaleur urbains et des îlots de fraîcheur de surface sur l'île de Montréal autant de jour que de nuit.

Pour ce faire, cette étude repose sur la télédétection et plus précisément sur l'imagerie thermique (capteur TABI-1800) et l'imagerie hyperspectrale (capteur CASI-1500). Cette méthode d'observation a fourni un portrait thermique diurne et nocturne détaillé ainsi qu'un portrait tout aussi détaillé du cadre bâti.

Ces données ont permis entre autres d'identifier le fait que les surfaces les plus chaudes durant le jour divergent de celles durant la nuit. De plus, il a été possible de confirmer le lien de causalité entre la végétation (NDVI) et les îlots de chaleur de surface diurne. Cependant, tout indique qu'il n'y a aucune corrélation entre le NDVI et les îlots de chaleur de surface nocturne. Une autre constatation est que l'effet rafraichissant des toits blancs n'est notable que le jour. Ces résultats ont mené à l'élaboration d'une liste de recommandations visant à mieux encadrer les divers projets d'atténuation, et, *de facto*, optimiser leurs impacts bénéfiques sur le climat urbain.

Mots-clés : îlot de chaleur urbain – télédétection – aéroportée – TABI-1800 – CASI-1500 – thermographie – NDVI

INTRODUCTION

L'îlot de chaleur urbain (ICU) est un phénomène climatique qui fait annuellement l'objet d'une multitude d'études scientifiques à travers le monde. Ce faisant, il est considéré comme étant le phénomène le plus étudié de la climatologie urbaine (Oke *et al.*, 1991; Saaroni *et al.*, 2000). Bien que le phénomène d'ICU n'ait connu un engouement médiatique que récemment, celui-ci est connu par la communauté scientifique depuis près de 200 ans. Le météorologiste Luke Howard a été le premier à observer et à analyser le phénomène d'îlot de chaleur urbain à Londres dès le début du XIX^e siècle, et ce, plusieurs décennies avant tout autre chercheur (Mills, 2008). En effet, ce n'est qu'à la fin des années 1960 que ce phénomène climatique suscite l'intérêt d'un plus grand nombre de climatologues (Oke et East, 1971). Cependant, les notions fondamentales entourant les ICU (observations et descriptions du phénomène et explications des causes) ont été majoritairement établies dans les années 1970 grâce, entre autres, aux travaux de Oke (Numez et Oke, 1977; Oke, 1970, 1976; Oke et East, 1971; Oke et Fuggle, 1972; Oke, et Maxwell, 1975; Yap et Oke, 1974). Depuis ce temps, le phénomène d'îlot de chaleur urbain a été étudié dans une multitude de villes de différente taille et dans différentes régions du monde dont Tokyo, Japon (Ichinose *et al.*, 1999), Beijing, Chine (Xiao *et al.*, 2007), Séoul, Corée du Sud (Kim et Baik, 2005), Baltimore, États-Unis (Li, D. et Bou-Zeid, 2013), Phoenix, États-Unis (Chow *et al.*, 2012), Manchester, Grande-Bretagne (Skelhorn *et al.*, 2014), Łódź, Pologne (Offerle *et al.*, 2005) et Montréal, Canada (Bergeron et Strachan, 2012; Oke et East, 1971; Oke et Maxwell, 1975).

Selon Arnfield (2003), la panoplie d'études portant sur les ICU réalisées depuis ces dernières décennies a permis de faire des percées majeures en ce qui a trait aux méthodes d'observation. En effet, celles-ci ont mené à une meilleure description du phénomène dans le temps et l'espace. Par ailleurs, bien qu'il reste une grande part d'inconnu, les études ont su approfondir énormément la compréhension des facteurs exacerbant le phénomène d'ICU. Bien qu'il y ait eu d'énormes avancées dans le domaine de la climatologie urbaine, un thème demeure relativement peu exploré: l'analyse fine du comportement thermique diurne et nocturne des surfaces à partir de la télédétection aéroportée.

La présente étude tente donc d'identifier les surfaces les plus chaudes durant le jour et la nuit, mais aussi les mesures d'atténuation qui apparaissent les plus prometteuses. Alors, il est important de mentionner que notre étude vise à déterminer les matériaux et les aménagements du territoire qui sont susceptibles de modifier le micro-climat urbain en période estivale, et ce, sur l'île de Montréal. Ultimement, nous estimons que les résultats obtenus pourront éclairer les instances publiques dans leurs processus de prise de décision en ce qui a trait à la planification de l'aménagement du territoire afin de faire face aux vagues de chaleur extrême. Ainsi, dans un premier, nous exposerons la mise en contexte de notre étude, s'en suivra la problématique ainsi que l'objectif principal et les objectifs secondaires. Par la suite, nous exposerons la méthodologie utilisée et les étapes nécessaires au traitement des données aéroportées. Enfin, nous présenterons les résultats obtenus suivis d'une analyse/discussion et de nos recommandations et des limites de cette recherche. Et bien évidemment, nous terminerons cette recherche avec une conclusion où seront expliquées les perspectives des études sur les îlots de chaleur urbains.

CHAPITRE I

MISE EN CONTEXTE

1.1 Profil démographique de la région de Montréal

La Communauté métropolitaine de Montréal (CMM) regroupe 82 municipalités dont celles notamment de l'agglomération de Montréal, de Longueuil et de Laval. En considérant les zones agricoles protégées, le territoire couvre une superficie de 3 837 km² (MAMROT, 2013). En 2013, la population de la CMM était de 3 779 188 habitants (MAMROT, 2013) alors que la population totale du Québec était de 7 977 989 en 2012 (ISQ, 2012). De ce fait, près de la moitié de la population québécoise vit sur le territoire de la CMM. Ainsi, la CMM représente la zone urbanisée la plus importante de la province en termes de nombre d'habitants. Il est pertinent de mentionner que la région a connu une augmentation marquée de sa population depuis les 50 dernières années. En effet, la région métropolitaine de Montréal (RMR) (territoire similaire à la CMM comprenant 7 municipalités de plus) est passée d'une population de 2 570 985 habitants en 1966, à une population totale de 3 824 221 en 2011 (Montréal, 2013) représentant un accroissement démographique de l'ordre de 32, 8 %. Cette explosion démographique et cette densification de la population ont eu plusieurs impacts sur l'aménagement du territoire.

1.2 La croissance de l'urbanisation et l'étalement urbain

L'accroissement démographique de la CMM s'est fait conjointement avec un étalement urbain. Celui-ci s'est traduit par une augmentation marquée de la superficie des surfaces artificielles minéralisées (béton, asphalte, etc.), et ce, au détriment des espaces végétalisés (boisés). À titre indicatif, en 1966, 40 % de la superficie du territoire de la CMM était occupée par le bâti alors qu'en 1994 celui-ci a passé à 70 % (Cavayas et Baudouin, 2008). Ceci représente un rythme d'urbanisation de l'ordre de 14 km²/an durant cette même période. Bien entendu, cette modification de l'occupation du sol engendre plusieurs conséquences négatives dont l'augmentation des eaux de ruissellement canalisé (gestion de l'eau de pluie), mais surtout une modification du micro-climat urbain (hausse de la température de l'air) en période estivale. En effet, les travaux de recherche de Martin (2008) mettent en évidence le fait que la perte du couvert végétal peut entraîner une hausse des températures en milieu urbain. La figure 1.1 représente le cas d'un nouvel ensemble résidentiel de la ville de Longueuil. Il s'avère être un exemple par excellence de l'impact de l'étalement urbain entraînant une perte du couvert végétal et, du même coup, provoquant une hausse de la température de surface. Ce phénomène climatique propre au milieu urbain se nomme îlot de chaleur urbain.

1.3 Les types d'îlots de chaleur urbains et leurs définitions

Selon Voogt (2004), l'îlot de chaleur urbain est défini comme étant une différence de température entre la ville (milieu urbanisé) et son milieu environnant non urbanisé (milieu rural). Cette différence de température est généralement de 1 à 3 °C, mais sous certaines conditions « optimales » elle peut atteindre jusqu'à 12 °C. Or, dans la littérature scientifique, on distingue trois types d'îlots de chaleur urbains. Ils se distinguent par leurs caractéristiques et par leurs échelles ils se matérialisent (voir figure 1.2).

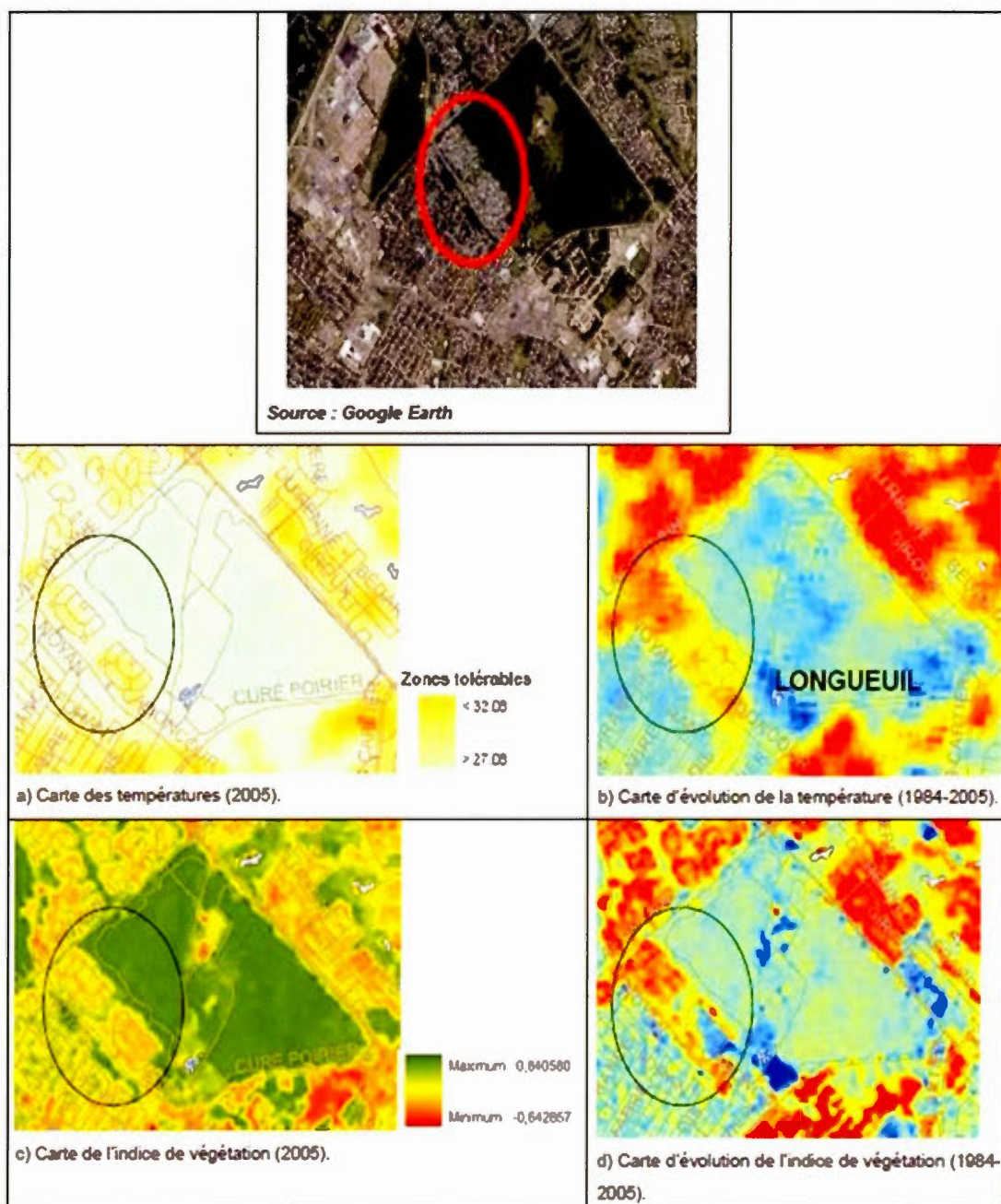


Figure 1.1 Mise en relation de la perte du couvert végétal causée par la création d'un ensemble résidentiel (encadré) et de l'augmentation de la température de surface dans un secteur de Longueuil entre 1984 et 2005. (Source : Martin, 2008)

Selon Voogt (2004), il y a d'abord l'îlot de chaleur de la limite atmosphérique. Celui-ci se retrouve dans la couche d'air qui englobe la limite supérieure des toitures des bâtiments jusqu'à une altitude variant entre quelques centaines de mètres jusqu'à environ un kilomètre. C'est donc en quelque sorte un dôme d'air plus chaud recouvrant l'entièreté d'une ville. Ce type d'ICU se manifeste à une échelle locale, voire régionale. Il est influencé, d'une part, par l'occupation du sol qui se trouve en dessous et, d'autre part, par des processus climatiques à plus petite échelle (Arnfield, 2003). S'en suit, l'îlot de chaleur de canopée qui fait référence à la couche d'air se

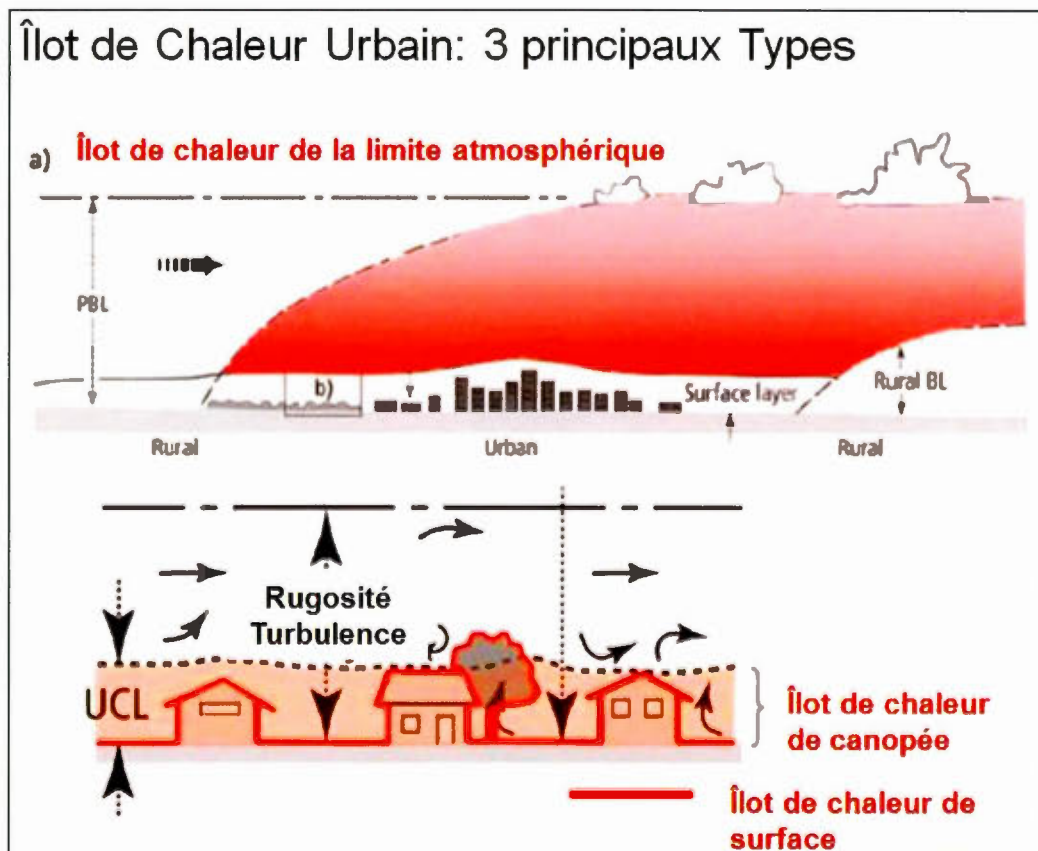


Figure 1.2 Schématisation des trois types d'îlots de chaleur urbains. Tiré de Lareau-Carpentier, 2012 (traduction de Oke, 1997).

situant entre la surface du sol et le sommet des bâtiments. L'intensité maximale est atteinte entre le coucher du soleil et quelques heures avant le lever du soleil. C'est

tout particulièrement cette couche d'air qui vient affecter le confort thermique de la population (EPA, 2008). Ce dernier prend forme à une micro-échelle et est fortement influencé par les échanges d'air et d'énergie générés par les surfaces qui constituent le milieu urbain (Arnfield, 2003). Finalement, l'îlot de chaleur de surface, contrairement aux deux premiers types, réfère non pas à la température de l'air, mais bien à la température des surfaces (Voogt, 2004). Puis, contrairement aux îlots de chaleur, l'intensité maximale des îlots de chaleur de surface est atteinte durant le jour lorsque les surfaces sont exposées aux rayonnements solaires.

1.4 Les changements climatiques et les vagues de chaleur extrême

Parallèlement à la croissance de l'étalement urbain, depuis la fin du XIX^e siècle, il se produit un réchauffement climatique à l'échelle planétaire représentant une hausse de la température moyenne planétaire d'environ 1 °C, et ce, causée par une augmentation de la concentration de gaz à effet de serre (GES) dans l'atmosphère générée par l'activité anthropique (GIEC, 2008). De surcroît, ce réchauffement climatique, selon les différents scénarios envisagés par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), devrait se perpétuer au cours du XXI^e siècle. En Amérique du Nord, le réchauffement climatique aura plusieurs répercussions. L'une d'elles est l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des vagues de chaleur.

Si le réchauffement climatique à l'échelle mondiale se produit à une intensité variable selon les régions du monde, sur le territoire québécois, cet accroissement de la température moyenne se manifeste également de manière disparate. En effet, entre 1960 et 2003, l'augmentation de la température annuelle moyenne dans la partie méridionale du Québec a été plus prononcée dans la partie sud et sud-ouest (1 à 1,25 °C) alors que dans la portion est, la hausse a été minime (0,25 °C) ou voire même nul dans certain cas (OURANOS, 2006).

1.5 Les vagues de chaleur et le milieu : un risque de santé majeur

Les vagues de chaleur extrême peuvent s'avérer être une cause de mortalité majeure. En effet, depuis les 30 dernières années, plusieurs vagues de chaleur extrêmes ont eu lieu en Europe et en Amérique du Nord et ont provoqué la mort de milliers de personnes, et ce, principalement dans les milieux urbanisés étant donné la mauvaise qualité de l'air et les températures plus élevées (Besancenot, 2002). À titre d'exemple, en juillet 1995, la ville de Chicago a été touchée par une vague de chaleur extrême qui a perduré durant une période de cinq jours provoquant la mort de 739 personnes et l'hospitalisation de 3 300 individus en lien avec les chaleurs accablantes (ASSSM, 2011). Huit années plus tard, l'Europe de l'Ouest a été touchée la vague de chaleur la plus intense de son histoire autant par le niveau de son intensité, de la durée que par l'étendue provoquant la mort de près de 70 000 individus, dont 15 000 uniquement sur le territoire français (INSERM, 2004). Or, les vagues de chaleur ne sont pas un risque naturel qui affecte exclusivement les États-Unis et l'Europe, le Québec et, plus particulièrement l'île de Montréal, a également été touché par une vague de chaleur majeure en juillet 2010. Celle-ci aurait possiblement causé la mort d'un peu plus de 100 personnes et peut-être même davantage (ASSSM, 2011).

1.6 La vulnérabilité à la chaleur : les aînés, les plus à risque

Il est nécessaire de mettre en évidence que tous ne sont pas affectés de la même façon par les vagues de chaleur extrême. Le suivi sur la surmortalité de la canicule de 2003 en France réalisé par l'INSERM (2004) a révélé qu'elle avait affecté principalement les personnes âgées entre 45 et 75 ans, mais surtout celles de plus de 75 ans. Si l'âge avancé est un facteur important, le fait d'être atteint d'un problème cardio-vasculaire ou d'une maladie telle que la schizophrénie augmente grandement le risque de mortalité (ASSSM, 2011).

1.7 Prises de conscience du risque, les mesures d'atténuation

Afin de remédier à ce problème de santé publique en cas de chaleur extrême, divers acteurs politiques de différents paliers de gouvernance ont mis en place des mesures d'atténuation¹. Celles visent, dans un premier temps, à informer des dangers par l'entremise de campagnes de sensibilisation afin d'amoindrir la vulnérabilité de la population, et, dans un deuxième temps, à créer des projets de réaménagement ayant comme but principal d'atténuer la chaleur au sol pour ainsi diminuer l'aléa à la source. Pour ce qui est des mesures d'atténuation liées à l'aménagement du territoire, certains arrondissements montréalais sont prêts à investir des centaines de milliers de dollars pour en faire l'implantation (Projet-Montréal, 2012).

Selon Rosenzweig *et al.* (2009), les mesures d'atténuation se divisent en trois grandes catégories. D'abord, il y a les matériaux à haut albédo. Ceux-ci tirent leur efficacité à réduire la température en réfléchissant une part plus importante de la radiation solaire. Un exemple de ce type de mesure d'atténuation est le blanchiment de toit plat, soit en y appliquant de la peinture où soit en y en ajoutant un agrégat de couleur pâle.

De plus en plus populaires, les toitures végétalisées (toits verts) demandent plusieurs modifications autant au niveau de la structure des bâtiments que de la toiture en soi afin de pouvoir y faire la plantation de végétaux. Plus onéreuses que le revêtement à haut albédo, elles permettent un rafraîchissement de l'air environnant grâce à l'évapotranspiration du sol et des plantes, et en offrant de l'ombre à la toiture. Si une différence de température est notable dans la couche de l'air à proximité du toit, c'est davantage à l'intérieur du bâtiment qu'on remarque une différence de température (Jacquet, 2010). Par ailleurs, cette mesure offre d'autres services

¹ Le terme « atténuation » est le pendant francophone du mot *mitigation* qui fait référence à toutes actions menant à la réduction de l'intensité de certains aléas naturels et à la réduction de la vulnérabilité (Actu-environnement, 2012). De ce fait, dans la présente, le terme « atténuation » sera privilégié au détriment de l'anglicisme *mitigation*.

écologiques intéressants tels que la rétention de l'eau de pluie et la séquestration du CO₂ (Coutts *et al.*, 2010).

Finalement, la sylviculture en milieu urbain est une méthode qui privilégie la plantation d'arbres dans les espaces vacants et au pourtour des rues. Cette mesure est efficace grâce à l'ombrage qu'elle procure aux façades des immeubles et à la surface du sol. Tout comme les toitures végétalisées, la plantation d'arbres permet d'absorber le CO₂ (Rosenzweig *et al.*, 2009).

Il est important de mentionner que la presque totalité de ces mesures n'a jamais été assujettie à des études ayant comme objectif de mesurer leur efficacité à contrer la formation des îlots de chaleur urbains. Les quelques études réalisées mettaient principalement l'accent sur la performance énergétique des bâtiments munis de toiture végétalisée situés au centre-ville de Montréal comme l'ont fait Bass et Baskaran (1999) et Jacquet (2010). En d'autres mots, ces études ont démontré l'efficacité à réduire l'accumulation de chaleur à l'intérieur même des bâtiments, et plus ou moins à mesurer l'efficacité à réduire la température à l'extérieur. L'une des raisons pour laquelle il n'y a pas eu d'étude démontrant l'efficacité des mesures d'atténuation sur le territoire de la CMM, vient du fait qu'elles ont été réalisées à une trop petite échelle pour faire l'analyse thermique de ces dernières.

1.8 La télédétection et les images satellitaires: outil d'analyse des îlots de chaleur urbains

Depuis, une dizaine d'années quelques études portant sur les îlots de chaleur urbains, plus précisément sur les îlots de chaleur de surface ont été effectuées sur le territoire de l'île de Montréal par Lachance (2005), Leprince (2008) et (Martin, 2008). Ces recherches se basaient principalement sur les images thermiques du satellite *Landsat 5*. Cette méthode d'observation offre plusieurs avantages. En effet, elle permet de dresser un portrait thermique général sur une zone de plusieurs dizaines de kilomètres

carrés, et ce, sur l'ensemble de la planète. Un autre avantage est l'immense collection d'images qui s'étend sur une période de près de 30 ans (*Landsat 5* a été lancé en orbite en 1984 et mis hors fonction en décembre 2012 (USGS, 2012). Finalement, le principal avantage des images *Landsat 5* est qu'elles sont disponibles gratuitement. Grâce à ces images satellitaires, plusieurs constatations ont été mises de l'avant. L'une des plus importantes est sans contredit l'impact négatif de l'augmentation des surfaces minéralisées au détriment du couvert végétal causé par l'étalement urbain (Martin, 2008).

Cependant, les images satellitaires de *Landsat 5* comportent deux grandes lacunes: leur faible résolution spatiale (120 m) et leur faible résolution temporelle (acquisition à tous les 16 jours aux alentours de 11h00 pour l'île de Montréal). Dès lors, il est seulement possible de décomposer l'aménagement du territoire en grands ensembles tels que les secteurs industriels, commerciaux, résidentiels, etc., ou bien de le présenter comme étant un espace végétalisé ou un espace minéralisé. Ainsi, l'analyse réalisée à l'aide de cette méthode d'observation ne peut se faire qu'à petite échelle. Il est donc ardu d'analyser individuellement les éléments qui composent ces grands ensembles en milieu urbain comme, les routes, les toitures, les arbres, etc. Qui plus est, étant donné que le captage de *Landsat 5* se fait presque exclusivement en fin de matinée, il devient difficile de réaliser une étude du comportement thermique des surfaces de nuit. Ceci représente un manque important considérant le fait que les îlots de chaleur urbains atteignent généralement leur intensité maximale la nuit (Oke et Maxwell, 1975). Par ailleurs, plusieurs mesures d'atténuation pour contrer la formation des îlots de chaleur urbains ont été mises en place sur le territoire montréalais telles que les ruelles vertes, la plantation d'arbres, les toitures réfléchissantes (toits blancs) et les toitures végétales. Or, ces initiatives occupent dans bien des cas que quelques dizaines de mètres carrés. Dès lors, celles-ci ne sont pas perceptibles sur les images thermiques acquises par *Landsat 5* (résolution de 120 m dans le thermique) ou même *Landsat 8* (résolution de 100 m dans le thermique).

1.9 Le bilan

Force est donc de constater que les vagues de chaleur extrêmes provoquées ou exacerbées par la présence d'îlots de chaleur urbains représenteront dans un avenir rapproché un risque de santé publique majeur dans le contexte de changement climatique actuel (augmentation de l'aléa) et dans le contexte de vieillissement inéluctable de la population québécoise (augmentation de la vulnérabilité) (ISQ, 2012). De plus, considérant le rythme d'urbanisation et le poids démographique de la Communauté métropolitaine de Montréal, la problématique sera d'autant plus majeure pour cette région du Québec. Malgré que des études portant sur les îlots de chaleur urbains ont été menées à terme ces dernières années, aucune d'entre elles ne permet d'affirmer avec justesse leur capacité de rafraîchissement étant donné la faible résolution spatiale des images thermiques utilisées.

1.10 Problématique et objectifs de recherche

C'est dans ce contexte que s'insère l'objet d'étude de cette recherche sur les îlots de chaleur urbains du territoire de l'île de Montréal. L'objectif principal est d'analyser le comportement thermique des surfaces en milieu urbain afin de maximiser l'efficacité des mesures d'atténuation visant à diminuer l'intensité des îlots de chaleur urbains estivales sur l'île de Montréal. Pour répondre à cet objectif, trois objectifs secondaires seront mis de l'avant soit 1) localiser les îlots de chaleur de surface diurnes et nocturnes, 2) déterminer les facteurs majeurs influençant la température de surface de jour et de nuit, 3) identifier les éléments du cadre bâti responsables des îlots de chaleur urbains et des îlots de fraîcheur de surface sur l'île de Montréal autant de jour que de nuit.

1.11 Présentation et description de la zone d'étude

1.11.1 Localisation et profil sociodémographique

L'île de Montréal se situe dans la région sud-est de la province du Québec. En 2010, cette agglomération comptait une population de 1 886 481 habitants répartis dans 16 différentes villes (Ville de Montréal, 2014). À elle seule, la ville de Montréal englobait presque la totalité de la population de l'agglomération montréalaise avec ces 1 649 519 citoyens. Cette dernière comporte 19 arrondissements.

Dans la présente recherche, la zone d'étude choisie se localise plus précisément dans l'arrondissement Mercier-Hochelaga-Maisonneuve (figure 1.3). Quatrième arrondissement montréalais le plus peuplé, Mercier-Hochelaga-Maisonneuve couvre une superficie de 25,4 km² et comptait en 2010 131 500 habitants ce qui



Figure 1.3 Localisation de l'arrondissement Mercier-Hochelaga-Maisonneuve. (Source : Ville de Montréal, 2014)

des secteurs à vocation mixtes (immeubles à logements, commerciaux, industriels légers) et à vocation d'emplois/économiques (immeubles industriels, à bureaux et commerciaux). De plus, il y a une présence importante, mais néanmoins disparate, de végétation (arbres matures et surfaces gazonnées) sur l'ensemble du territoire. Une part non négligeable de cette végétation se concentre dans les nombreux parcs et d'espaces verts.

Une autre particularité de l'aménagement de l'arrondissement est que la hauteur des bâtiments est somme toute homogène et relativement peu élevée (figure 1 5). En effet, les bâtiments sont généralement d'une hauteur de 2 à 3 étages à l'exception de quelques bâtiments industriels/commerciaux et de lieux de culte.

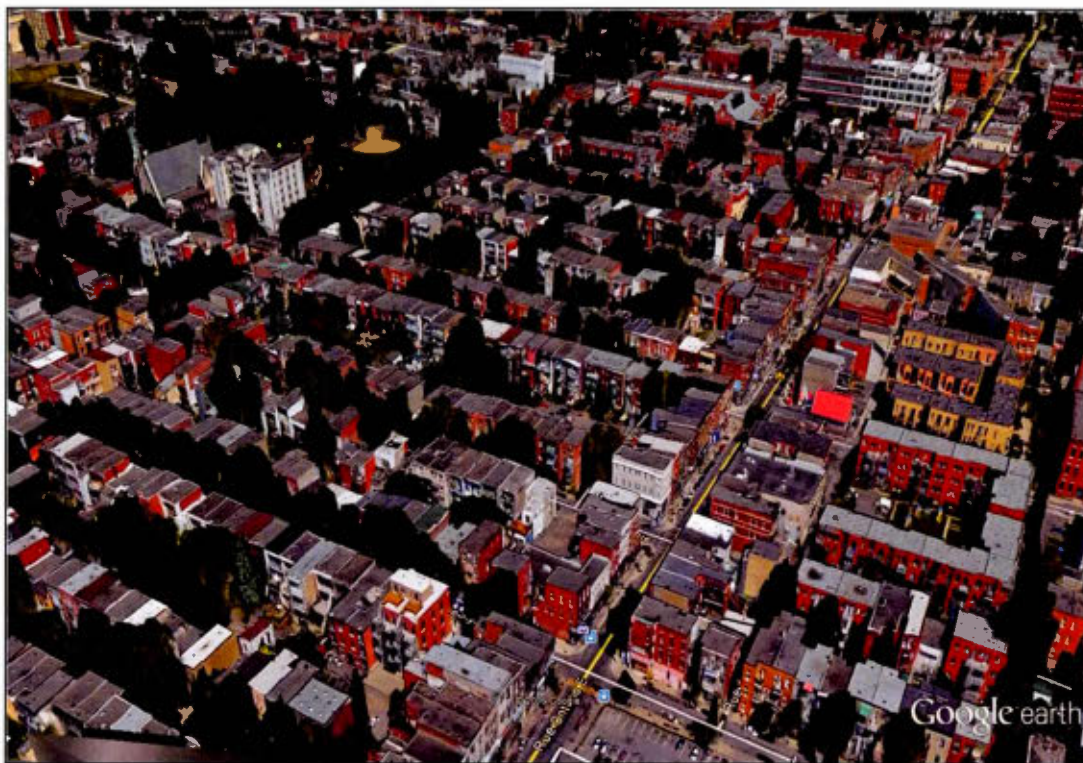


Figure 1.5 Exemple de la répartition de la végétation et de la hauteur homogène des bâtiments dans l'arrondissement. (Source: Google Earth, 2016)

1.12 Justification de la sélection de la zone d'étude

Considérant les objectifs de la recherche et la méthode d'observation, trois caractéristiques essentielles ont permis de déterminer la zone d'étude.

1.12.1 Un échantillon de la ville de Montréal représentatif et varié de l'aménagement du territoire

D'entrée de jeu, l'arrondissement de Mercier–Hochelaga-Maisonneuve possède une diversité importante dans la forme et dans les types d'aménagement tels que des espaces verts, des immeubles résidentiels de type « plex », des immeubles à vocation commerciale et mixte et des bâtiments industriels. Cette variété d'aménagement n'est pas spécifique à l'arrondissement, mais bien représentative de plusieurs secteurs de la ville de Montréal. Considérant le fait que la présente étude a comme objectif de comprendre la dynamique thermique de l'ensemble de l'île de Montréal, cette caractéristique était essentielle.

1.12.2 Une morphologie urbaine homogène et peu ombragée

L'imagerie aéroportée à haute résolution constitue la méthode principale pour l'acquisition des données pour cette recherche. Or, bien que cette méthode d'observation offre des images très détaillées, en milieu urbain et tout particulièrement dans les zones avec une forte densité d'immeubles de plusieurs étages, il peut avoir une perte importante d'information due à l'ombre projetée au sol et sur les autres bâtiments. Dès lors, l'arrondissement Mercier–Hochelaga-Maisonneuve offre une scène urbaine optimale pour la télédétection à haute résolution puisque le cadre bâti est relativement plat (immeubles principalement de trois étages et moins).

1.12.3 Une population particulièrement à risque aux chaleurs extrêmes

Une caractéristique sociale de Mercier–Hochelaga–Maisonnette est qu’une part importante de la population vit dans une situation de vulnérabilité en cas de période de chaleur extrême. En effet, Lareau Carpentier (2012) identifie Mercier–Hochelaga–Maisonnette comme étant le 2^e arrondissement ayant le plus grand nombre de zones vulnérables. Elle a obtenu ces résultats en conjuguant des données de températures de surface (image satellitaire) et la situation socio-économique soit la défavorisation sociale (personne vivant seule) et matérielle (faible revenu).

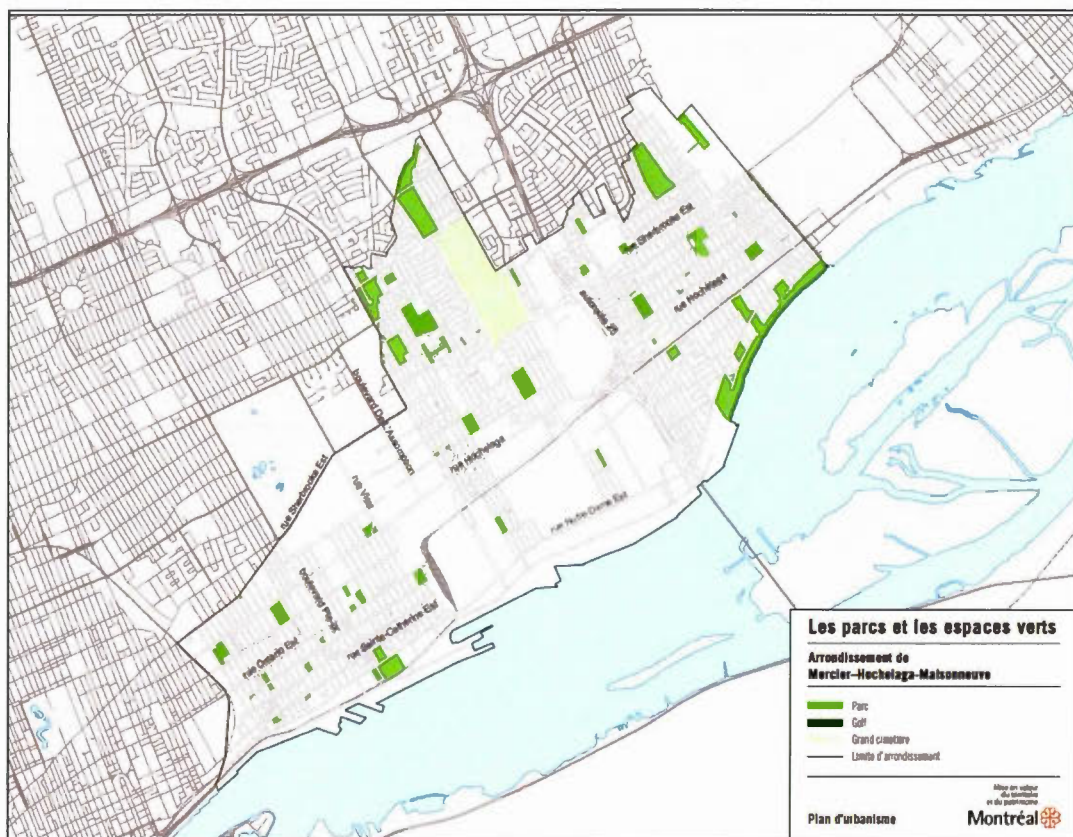


Figure 1.6 Répartition des parcs et espaces verts de l’arrondissement Mercier–Hochelaga–Maisonnette. (Source : Ville de Montréal, 2014)

CHAPITRE II

MÉTHODOLOGIE

Considérant que la présente recherche porte sur les températures de surfaces, les données utilisées ont été principalement acquises à partir de la télédétection et plus précisément par l'imagerie aéroportée thermique et hyperspectrale (visible) à haute résolution. L'avantage de ce choix est qu'il permet de recueillir des données sur une grande superficie relativement vaste tout en offrant un haut degré de précision et de détails (Voogt et Oke, 2003). C'est ainsi que le présent chapitre vise à présenter les données utilisées et la méthodologie qui ont été nécessaires afin de caractériser le cadre bâti et mesurer les températures diurnes et nocturnes de surfaces. Les étapes nécessaires à la réalisation de ce projet de recherche sont synthétisées dans la figure 2.1.

2.1 Méthode d'acquisition et description des données

2.1.1 Les survols aéroportés

Afin de couvrir près de 50 % de la superficie de l'île de Montréal (portion sud-est), 11 lignes de vol ont été effectuées et ont généré un nombre total de 33 images (11 images thermiques de jour, 11 images thermiques de nuit et 11 images hyperspectrales). L'acquisition des images s'est déroulée en deux étapes. Le premier survol a été effectué le 1^{er} septembre 2012 entre 13h00 et 16h00 (images thermiques et hyperspectrales), et le second a été réalisé durant la nuit du 2 septembre 2012 entre 2h00 et 4h00 (images thermiques).

Démarche méthodologique

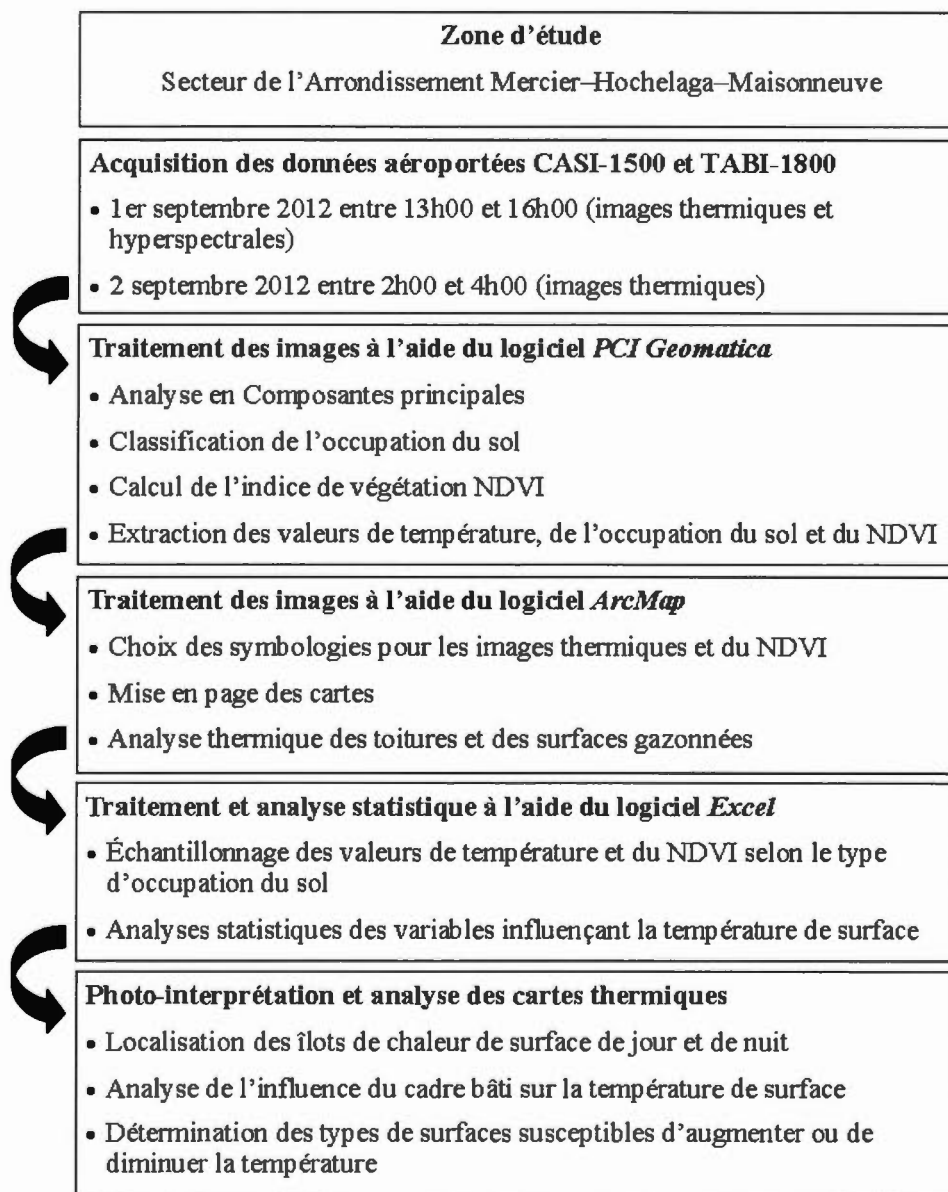


Figure 2.1 Démarche méthodologique

2.1.2 Les images hyperspectrales (visibles) et le capteur CASI-1500

Le capteur CASI-1500 de la compagnie de ITRES *Research* de Calgary est un appareil d'imagerie hyperspectrale de type *Pushbroom* et dont le champ de vision est de 40° (ITRES, 2010a). Le spectre électromagnétique saisi par le capteur se situe entre 370,7 μm et 1043,3 μm et est réparti en 72 bandes (Tableau 2.1). Chacune des bandes a un spectre électromagnétique d'environ 10 μm .

Tableau 2.1 Répartition de la longueur d'onde centrale (+/- 7,4 μm) de chacune des 72 bandes des images générées par le capteur CASI-1500

Bande	Longueur d'onde (μm)	Bande	Longueur d'onde (μm)	Bande	Longueur d'onde (μm)	Bande	Longueur d'onde (μm)
1	370,7	19	541,3	37	712,1	55	882,8
2	380,2	20	550,8	38	721,6	56	892,2
3	389,9	21	560,2	39	731,1	57	901,7
4	399,1	22	569,7	40	740,6	58	911,1
5	408,6	23	579,2	41	750,1	59	920,6
6	418,0	24	588,7	42	759,6	60	930,1
7	427,5	25	598,2	43	769,0	61	939,5
8	437,0	26	607,7	44	778,5	62	949,0
9	446,4	27	617,2	45	788,5	63	958,4
10	455,9	28	626,7	46	797,5	64	967,9
11	465,4	29	636,2	47	807,0	65	977,3
12	474,9	30	645,7	48	816,5	66	986,7
13	484,4	31	655,2	49	825,9	67	996,7
14	493,8	32	664,7	50	835,4	68	1005,6
15	503,3	33	674,1	51	844,9	69	1015,0
16	512,8	34	683,6	52	854,4	70	1024,5
17	522,3	35	693,6	53	863,8	71	1033,9
18	531,8	36	702,6	54	873,3	72	1043,3

2.1.3 Les images thermiques et le capteur TABI-1800

Les images thermiques ont été acquises par le capteur TABI-1800 (*Thermal Airborne Broadband Imager*). Selon les renseignements fournis par ITRES (2010b), ce capteur également de type *Pushbroom* utilise les ondes électromagnétiques du moyen infrarouge (3,7 à 4,8 microns). Son champ de vision est de 40° et son degré de précision est inférieur à 0,05 °C. Lors du vol aéroporté, celui-ci était fixé à un avion

volant à une altitude de (2000 m) ce qui a permis d'atteindre une résolution spatiale de 80 cm.

2.1.4 Les conditions météorologiques lors du survol aéroporté

Les données météorologiques utilisées proviennent de la station météorologique de l'aéroport int. Pierre-Elliott Trudeau (Montréal) étant donné que c'est la station la plus près de notre zone d'étude. Selon les données d'Environnement Canada (2012a, 2012b, 2012c), lors du premier passage (la nuit), la température a atteint un minimum de 16,4 °C (4h00 le 1^{er} septembre 2012) et lors du deuxième passage (le jour) la température a atteint un maximum de 25,3 °C (15h00 le 2 septembre 2012) (figure 2.1). Pour sa part, l'humidité relative était d'environ 30 % lors du premier survol alors qu'elle a atteint un maximum de 77 % lors du passage nocturne. Fait important, lors des deux passages de l'aéronef, le ciel était dégagé et le vent était faible soit entre

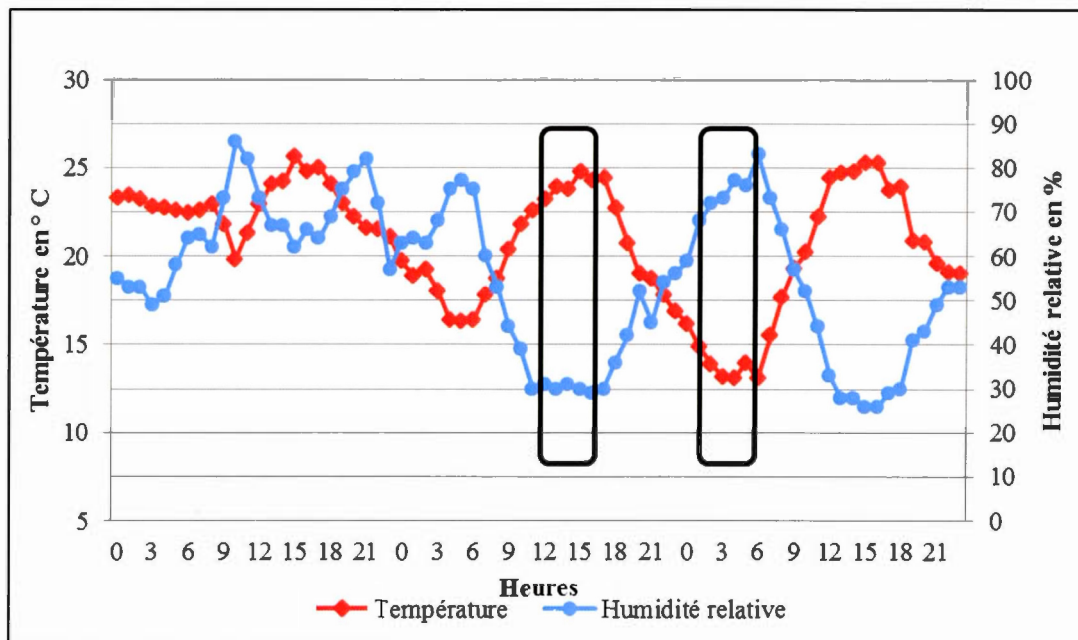


Figure 2.2 Variation de la température de l'air et du taux d'humidité relative entre le 31 août et le 2 septembre 2012, station météorologique de l'aéroport int. Pierre-Elliott Trudeau, Montréal. (Source : Environnement Canada, 2012a, 2012b, 2012c).

0 et 11 km/h. Il est à noter également que durant les 24 heures précédant le vol, il n'y a eu aucune précipitation. Seulement un total de 1,4 mm de précipitation a été enregistré à l'aéroport int. Pierre-Elliott Trudeau le 30 août 2012 (Météomédia, 2012). En somme, nous pouvons affirmer que les conditions météorologiques étaient favorables à la prise d'images aéroportées, mais également à la formation des îlots de chaleur urbains (temps ensoleillé et vent faible) (Oke et Maxwell, 1975).

2.1.5 Traitement des images et corrections atmosphériques

Pour les images thermiques de jour et de nuit, la conversion des valeurs de luminance du capteur en degrés Celsius et la correction géométrique ont été effectuées par la compagnie *ITRES Research*. L'ensemble des images s'intègre dans le système de référence spatial *UTM zone 18 Northern Hemisphere* et le datum est le *WGS 1984*. Il est important de noter qu'aucune correction atmosphérique et qu'aucune correction liée à l'émissivité n'a été appliquée sur les images hyperspectrales et thermiques. Ceci occasionne nécessairement un biais en sous-estimant les valeurs de température obtenues. Ces données demeurent néanmoins une source fiable et pertinente d'information étant donné que l'aéroportée se faisait à basse altitude (impact plus faible de l'atmosphère sur l'absorption et émission d'infrarouge) et que les conditions météorologiques étaient stables (absence de nuage et faible vent) comme l'ont démontré Savelyev et Sugumaran (2008) et Pipia *et al.* (2011).

2.2 Les traitements et l'extraction des données des images

2.2.1 La sélection des images

Bien que la campagne aéroportée ait permis de générer 11 lignes de vol distinctes, pour cette recherche, nous n'avons utilisé que les images thermiques et hyperspectrales qui se retrouvent sur une même ligne de vol soit la ligne 3 (survol de Mercier-Hochelaga-Maisonneuve). Le choix d'utiliser les données provenant d'une seule ligne de vol s'est avéré évident, car nous voulions éviter les biais de températures de surface diurne liée à la variation de l'intensité de rayonnement

solaire causé par la période de temps séparant les prises des images. Moins significatif, ce biais est observable également pour les images nocturnes, mais dans ce cas, lié principalement à la déperdition de chaleur des surfaces. Ainsi, en s'attardant à une zone restreinte couverte par une seule image, il est possible d'éviter au maximum les biais par le temps de la prise de l'image.

2.2.2 La présentation des étapes nécessaires à la réalisation de la cartographie et des traitements statistiques

L'approche utilisée pour cette recherche s'attarde à l'information dite « interne » de l'image numérique. Caloz et Collet (2001) définissent ce type d'information comme étant exclusivement analogique, c'est-à-dire qu'elle fait référence aux valeurs de luminance enregistrées dans l'image numérique (ton, couleur). Bien que fondamentale, cette source d'information est insuffisante puisqu'elle n'offre aucun renseignement sur la nature des objets au sol, uniquement leur capacité à réfléchir les ondes électromagnétiques. C'est pour cette raison qu'il est également nécessaire d'enrichir l'analyse d'informations dites « externes ». Ces informations s'avèrent être des informations complémentaires (connaissances du photo-interprète, cartes thématiques, etc.) provenant partiellement d'éléments autres que celles enregistrées dans l'image (Caloz et Collet, 2001). Dès lors, l'image n'est plus considérée comme étant que des valeurs de luminance, mais bien comme étant une représentation de divers éléments réels (arbres, gazon, rues, toits, etc.). En d'autres mots, cette analyse repose sur la structure et la situation des éléments visibles sur l'image. Dans la présente section, nous allons décrire les multiples étapes qui ont été nécessaires à l'extraction de l'information « interne » et de l'analyse de l'information « externe ».

Étape 1 : Synthétisation de l'information des données TASI-1500 : transformation en composantes principales (TCP)

Les images hyperspectrales utilisées dans le cadre de ce projet offrent une foule de possibilités en ce qui a trait à l'analyse de l'occupation du sol étant donné leurs hautes

résolutions spectrales. Or, ce degré élevé de précision engendre un aspect négatif non négligeable soit l'espace considérable qu'occupe chacune des images et, *de facto*, exigent une quantité importante de ressources de l'ordinateur. Cependant, cette lourdeur des images hyperspectrales occasionnées par le grand nombre de bandes (72) peut être réduite significativement en synthétisant l'information sans pour autant diminuer la qualité de l'information grâce à la TCP. En effet, ce traitement statistique basé sur les principes de l'Analyse en composantes principales (ACP) offre la possibilité de regrouper les nombreuses composantes spectrales (bandes) en 2 ou 3 composantes selon les situations (Caloz et Collet, 2001).

Donc, cette opération a été appliquée pour l'image hyperspectrale sélectionnée. Cette étape a été réalisée à partir du logiciel *Focus* (PCI Geomatica) et de la fonction *Principal Component Analysis*. Un total de 72 nouvelles bandes ont été générées dont les deux premières synthétisaient respectivement 88 % et 11,5 % de l'information. Puisqu'elles résumaient presque l'entièreté de l'information, nous avons conservé que celles-ci. Ces deux bandes sont la base de l'information de la réalisation de la classification des types d'occupation du sol.

Étape 2 : Classification des types d'occupation du sol (classification dirigée)

Chaque élément se retrouvant à la surface de la Terre reflète, émet et absorbe à des intensités variables les ondes électromagnétiques selon leurs caractéristiques (composition chimique, températures, formes, textures, etc.) (Homayouni, 2005). C'est ce qui est considéré comme étant la signature spectrale. C'est sur ce principe que se base la télédétection, plus particulièrement, la photo-identification et la classification des types d'occupation du sol. En effet, un avantage important de la télédétection est la possibilité de classer des pixels homogènes c'est-à-dire partageant une signature spectrale similaire. Ainsi, il est possible de former des regroupements de pixels sous des classes ou thèmes (ex. arbres, eau, forêt, herbes,

etc.), et ce, réalisés à partir de méthodes arithmétiques (Ressources naturelles Canada, 2013). Cette classification tire sa pertinence du fait qu'elle couple les classes d'objets avec d'autres sources d'information externe à l'image et, par le fait même, de déterminer les différents liens de causalité qui les relient entre elles par des tests statistiques.

Cette méthode est considérée comme étant efficace tout particulièrement dans les zones vastes et relativement homogènes (Caloz et Collet, 2001). Or, étant donné l'hétérogénéité du milieu urbain tant dans les formes, hauteurs, textures, ombres, etc., l'efficacité à catégoriser les pixels d'une image selon leur signature spectrale peut, dans certaines occasions, s'avérer peu efficace (Caloz et Collet, 2001; Homayouni, 2005; Sebari et Morin, 2010). Cette confusion est causée entre autres par la grande diversité des matériaux de construction pour un même type d'occupation du sol et le recoupement des signatures spectrales. Ainsi, un toit de bâtiment peut être composé de divers éléments (système de ventilation, drain pluvial, revêtement en asphalte, des végétaux, etc.) et donc inévitablement de divers matériaux (aluminium, goudron, plantes, etc.) ce qui rend la classification précise ardue (Sebari et Morin, 2010). Un autre élément venant augmenter la confusion dans les classifications est le fait que différents groupements peuvent partager des matériaux similaires comme c'est le cas pour les toitures goudronnées et les rues, toutes deux étant enduites de goudron.

Donc, pour optimiser la justesse de la classification, nous avons opté pour la méthode de classification dirigée et nous nous sommes limités à 5 classes : herbe, arbres, bâti, ombre et surfaces blanches. Nous nous sommes arrêtés à ce choix de thématique, car ils sont omniprésents en milieu urbain et ils possèdent des signatures spectrales distinctes ce qui réduit les erreurs de classification entre les regroupements thématiques. Pour ce qui est de la méthode de classification, nous avons choisi la méthode dirigée et l'algorithme de classification de type *Maximum Likelihood* étant donné que cette dernière s'avère pertinente lorsque l'occupation du sol de la zone

d'étude est connue et que les thématiques étaient préalablement déterminées (Caloz et Collet, 2001).

Étape 3 : Analyse de la végétation : l'indice de végétation (NDVI)

Pour la zone d'étude, une cartographie de la végétation a été réalisée. Il nous apparaissait primordial d'effectuer cette étape, car l'apport de la végétation a été à maintes reprises considéré comme étant un élément fondamental dans l'explication des différences de températures en milieu urbain (Bowler *et al.*, 2010; Rizwan *et al.*, 2008). Avec les avancées de la télédétection, plusieurs indices de végétation ont été élaborés. Ceux-ci offrent la possibilité, évidemment, d'identifier le couvert végétal, mais également de décrire l'état phénologique (la variation de la teneur en humidité et de la densité du feuillage) de la végétation (Caloz et Collet, 2001).

L'ensemble des indices se base sur la signature spectrale spécifique des végétaux causés par la présence de chlorophylle. En effet, la chlorophylle a comme particularité d'avoir une réflectance élevée dans le spectre électromagnétique du proche infrarouge ($\pm 1 \mu\text{m}$) et une forte absorption du rayonnement électromagnétique dans le visible et tout particulièrement dans le rouge ($\pm 0,6 \mu\text{m}$) (Weier & Herring, 2000). L'un des premiers indices de végétation à avoir été créé (1974) est le *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) (Caloz et Collet, 2001). Le NDVI est considéré comme l'indice de végétation de référence et est, encore de nos jours, utilisé fréquemment dans les travaux de recherche portant sur les îlots de chaleur urbains (Anniballe *et al.*, 2014; Bokaie *et al.*, 2016; Gallo *et al.*, 1995; Heidl *et al.*, 2015; Li, X. *et al.*, 2013; Walker *et al.*, 2015; Yuan et Bauer, 2007). Cet indice tire sa popularité de sa simplicité d'utilisation. En effet, le calcul du NDVI octroie une valeur variant (théoriquement) entre -1 et 1 pour chacun des pixels de l'image (Weier & Herring, 2000). Lorsque le score obtenu est élevé, c'est-à-dire entre 0,7 et 0,9, cela représente un couvert végétal dense et verdoyant, alors qu'un

score de près de zéro ou moins signifie une zone absente de végétation. La formule du NDVI est :

$$NDVI = \frac{(PIR - R)}{(PIR + R)}$$

où PIR représente la bande infrarouge ayant enregistré la plus forte valeur de réflectance et R est la bande qui se situe dans les longueurs d'onde rouge ayant le taux de réflectance le plus faible. Pour notre recherche, nous avons utilisé une image hyperspectrale du capteur CASI-1500 et plus particulièrement deux bandes soit la bande 44 ($674,1 \pm 4,7$ nm) pour le PIR puisqu'elle possède la plus forte valeur de

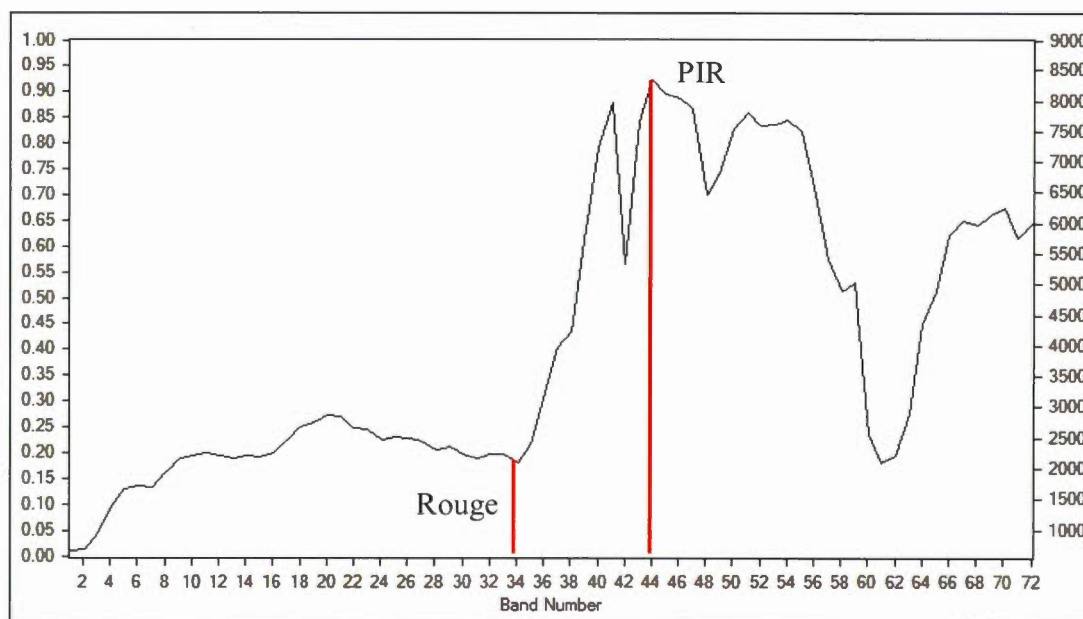


Figure 2.3 Représentation de la signature spectrale d'un pixel de végétation enregistré sur une image CASI-1500. Les lignes rouges indiquent les bandes ayant la plus forte réflectance (bande 44) et la bande ayant la plus faible réflectance dans le spectre du visible (bande 34).

réflectance et la bande 34 ($778,5 \pm 4,7$ nm) pour le R puisqu'elle a la plus forte absorption dans les ondes du visible (figure 2.3). L'ensemble des opérations ayant mené à la création du NDVI ont été effectuées à partir du logiciel *Focus (PCI Geomatica)* et de la fonction *EASI Modeling*.

Étape 4 : Analyse du comportement thermique des surfaces et traitements statistiques

D'une superficie de $0,16 \text{ km}^2$, la zone échantillonnée se situe au sud-ouest de l'arrondissement Mercier-Hochelaga-Maisonneuve (voir Figure 5). Pour ce faire, nous nous sommes attardés à quatre différentes thématiques : la température de jour, la température de nuit, l'occupation du sol (herbe, arbres, bâti, ombre et surfaces blanches) et le NDVI. Afin de rassembler toutes ces informations matricielles, nous les avons extraites et importées dans un fichier de type tableur. Ainsi, cette opération permet d'obtenir les valeurs numériques des quatre thématiques pour tous les pixels situés à l'intérieur de la zone d'échantillonnage. Le tout a été réalisé grâce à la fonction *Numwrit* du logiciel *Focus* (PCI Geomatica). Au total, la zone échantillonnée est composée de 82 307 pixels. Considérant le nombre important de



Figure 2.4 Localisation de la zone d'échantillonnage (encadré rouge).
(Source : image RGB créée à partir de l'image CASI-1500, 1^{er} septembre 2012)

données, nous avons réduit ce nombre à 700 (quantité maximale supportée par *Excel*) afin de faciliter les analyses statistiques subséquentes. Pour éviter les biais en sélectionnant manuellement les données, nous avons appliqué un échantillonnage aléatoire à partir de la fonction *Alea* du logiciel tableur *Excel* et qui considérait les types d'occupation du sol. Ainsi, nous avons veillé à ce que tous les pixels qui avaient été classifiés comme étant «ombre» soient automatiquement rejetés de l'échantillon et pour les quatre autres types d'occupation du sol, 175 pixels ont été sélectionnés pour chacune de ces classes. Finalement, à partir de cet échantillon, nous avons validé les relations linéaires entre paires de variables entre elles soient le NDVI et la température de jour; le NDVI et la température de nuit; la température de jour et la température de nuit.

Étape 5 : Évaluation de l'albédo et apport de l'humidité de l'herbe sur les températures de surface.

Un nombre considérable d'études ont démontré que l'albédo (faible réflectance) est une des caractéristiques du milieu urbain favorisant la formation des îlots de chaleur urbains (Arnfield, 2003; Bowler *et al.*, 2010; Bretz *et al.*, 1998; Taha, 1997; Takebayashi et Moriyama, 2007). Or, pour mesurer adéquatement de manière quantitative l'albédo des matériaux, une panoplie de paramètres doit être prise en considération afin que les résultats obtenus soient représentatifs ce qui rend obligatoirement cette tâche fastidieuse. Dès lors, nous avons évalué l'albédo qualitativement afin de faciliter l'acquisition des données. De plus, étant donné l'échelle à laquelle nous étudions le phénomène, il semble peu nécessaire d'avoir une précision élevée. Nous avons donc sélectionné quatre toits plats ayant des teintes différentes, soit blanc, gris pâle, gris foncé et noir. Nous avons décidé de focaliser notre évaluation sur les toitures puisqu'elles sont fabriquées d'un matériau commun : l'asphalte. Ainsi, ce choix amoindrit l'influence des paramètres tels que la différence d'épaisseur et de densité sur les valeurs des résultats. Par la suite, comme à l'étape

précédente, nous avons extrait les valeurs de température de jour et de nuit pour les toits échantillonnés et nous avons appliqué des analyses statistiques de base telles que la moyenne, les valeurs maximales et minimales, l'écart-type, et ce, pour les températures nocturnes et diurnes.

Une autre caractéristique qui est considérée dans un grand nombre d'études comme étant un facteur majeur dans la formation des ICU est l'évapotranspiration de la végétation. Pour évaluer son effet sur la température de surface, nous avons comparé le comportement thermique d'un terrain gazonné naturel, un terrain gazonné entretenu (arrosé et fertilisé) et un terrain de gazon synthétique. Pour ce faire, nous avons également appliqué la même procédure que pour les toitures.

Étape 6 : Sélection de la mise en classe et de la symbologie des cartes thermiques

Pour la symbologie utilisée lors de la création des cartes thermiques de jour et de nuit, nous avons opté pour une seule trame de couleur, mais avons utilisé deux mises en classes différentes de type graduel (dégradé de couleur sans limites de classe). La méthode de discrétisation privilégiée est celle de l'écart-type, car elle mettait bien en relief les disparités thermiques.

Bien qu'il soit souhaitable d'avoir une mise en classe unique afin de faciliter la comparaison et l'analyse de la dynamique thermique des surfaces, nous avons dû nous résigner à utiliser deux mises en classes différentes pour la cartographie de jour et de nuit. La raison pour laquelle nous avons fait ce choix est qu'indépendamment des méthodes de discrétisation ou de la trame de couleur sélectionnées, il était impossible de conjuguer une mise en classe unique pour les cartes de jour et de nuit. Le problème principal issu d'une mise en classe unique est que celle-ci ne permet pas de bien mettre en lumière les valeurs extrêmes. Il était seulement possible de mettre en relief soit les disparités thermiques des valeurs de jour ou seulement les disparités thermiques des valeurs de nuit.

La raison majeure de ce problème est que la répartition des valeurs est très hétérogène. En effet, les températures de nuit se répartissent principalement entre 4 °C et 16 °C, et la moyenne est de 11,5 °C et l'écart-type est de 2,5 alors que les températures de jour se répartissent quant à elles principalement entre 15 °C et 50°C, avec une moyenne de 24,7 °C et un écart-type de 6,8. Néanmoins, il est pertinent de souligner que l'utilisation de deux différentes mises en classes a été également appliquée dans d'autres recherches sur la comparaison des températures des matériaux de jour et de nuit comme c'est le cas pour Lo *et al.* (1997) et Pipia *et al.* (2011).

Étape 7 : Analyse de l'aménagement du territoire: l'interprétation des images

L'analyse de l'occupation du sol automatisée (classification supervisée) a été complétée par photo-interprétation, car il nous apparaissait primordial d'approfondir l'analyse de l'aménagement du territoire. Toutefois, ceci ne peut pas être uniquement réalisé adéquatement à partir des méthodes analogues de photo-identification due à un manque de performance des logiciels de classification (Provencher et M. Dubois, 2007). Pour ce faire, nous avons dû avoir recours à la photo-interprétation qui se base obligatoirement sur la connaissance et l'expérience du raisonnement humain. Ainsi, grâce à la photo-interprétation, il est possible de mettre en relation l'aménagement du territoire, les types d'occupation du sol et la température des surfaces tout en les situant les uns par rapport aux autres. Ainsi, cette approche offre un regard et une analyse holistique sur le comportement thermique des surfaces et les éléments qui constituent le milieu urbain rendant possible, du coup, de mettre en lumière les agencements urbains dont les températures sont les plus élevées. Cette approche a permis de situer les zones à prioriser dans une optique d'implantation de mesures d'atténuation et également de discriminer les types d'aménagement les plus prometteurs et les plus pertinents à incorporer dans d'éventuels projets visant à réduire l'effet des îlots de chaleur urbains.

CHAPITRE III

PRÉSENTATION DES RÉSULTATS

3.1 Description des types de surface par l'entremise de la TCP : la cartographie de l'occupation du sol

3.1.1 Analyse de la carte de la classification supervisée et de l'occupation du sol

L'observation de la carte d'occupation du sol permet de constater qu'à l'intérieur de la zone d'échantillonnage (Figure 3.1, encadré rouge) se retrouvent les cinq types d'occupation du sol de la classification. La zone d'échantillonnage comptabilise un total de 82 307 pixels qui se répartissent de la manière suivante:

- 9 591 pixels d'herbe
- 23 232 pixels d'arbres
- 29 263 pixels de bâti
- 18 061 pixels d'ombre
- 2 161 pixels de surface blanche.

La comparaison de la carte de classification et de l'image aéroportée correspondante met en relief le fait que la classification comporte très peu de confusion (figure 3.1). En effet, la classification a été très performante sur l'ensemble des surfaces gazonnées comme nous pouvons l'observer avec le terrain de baseball ainsi qui ont été classifiés comme étant des ARBRES alors qu'ils étaient en réalité de l'HERBE.



Pour ce qui est de la thématique ARBRES, celle-ci est également très juste. À cette échelle, il est difficile de repérer des pixels ayant été confondus avec une autre classe ce qui met en évidence l'efficacité de la classification.

Dans le cas de l'OMBRE, la véracité de la classification est très élevée sur l'ensemble de l'image. Or, seulement certaines portions de l'image où l'on retrouve une forte concentration d'arbres matures (voir figure 3.1 c.) semblent avoir une confusion avec la thématique ARBRES.

Par la suite, la troisième thématique mise en place est le BÂTI. À noter, cette classe intègre les toitures et les routes sans pour autant les distinguer les unes des autres. Elles sont donc considérées par la classification comme un même groupement. Leurs signatures spectrales respectives sont très similaires, de sorte qu'il est ardu pour le logiciel de les distinguer.

Finalement, la thématique SURFACE BLANCHE recouvre les toits blancs, à l'exception de la surface de terre du terrain de baseball. Nous pouvons constater que cette classe est celle dont la qualité de la classification comportant le plus grand nombre de confusion. En effet, une part importante des pixels représentant des toits blancs ont été considérés par la méthode de classification comme étant du BÂTI plutôt qu'une SURFACE BLANCHE (voir figure 3.1 d. et e.).

De plus, afin de compléter la vérification visuelle pour la validation de la justesse de la classification de l'occupation du sol, une matrice de confusion a été générée à partir des sites d'entraînement utilisés pour la classification. Les valeurs obtenues oscillent entre 100 et 99,36 et la moyenne est de 99,75 % (tableau 3.2). Par ailleurs, un autre test statistique a été appliqué afin de valider la fiabilité de la classification : le coefficient de Kappa. Le résultat obtenu était de 0,997. À la lumière de ces résultats, il convient que la classification du sol est somme toute adéquate.

Tableau 3.1 Matrice de confusion de la classification de l'occupation du sol à partir des zones d'entraînement utilisées pour la classification supervisée.

Classe	Code	1	2	3	4	5
Herbe	1	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Arbre	2	0,50	99,40	0,00	0,00	0,00
Bâti	3	0,00	0,00	100	0,00	0,00
Ombre	4	0,00	0,00	0,64	99,36	0,00
Toit blanc	5	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00

3.2 Cartographie de l'indice de végétation NDVI

3.2.1 Répartition de la végétation

L'élaboration de la cartographie du NDVI (figure 1.2) a rendu possible la discrimination entre les superficies végétalisées et celles recouvertes de matériaux minéralisés. Les taux obtenus sur l'ensemble de la carte varient entre 0,86 (en vert) et -0,13 (en rouge). Donc, les routes et les toitures ont obtenu des taux près de zéro (entre -0,13 et 0,1). Pour ce qui est des secteurs recouverts d'arbres, ceux-ci obtiennent les taux les plus élevés ($\pm 0,8$) et les valeurs sont très homogènes. Or, les zones recouvertes d'herbe obtiennent un indice de végétation nettement moins bien défini que les deux groupements précédents. En effet, elles oscillent entre 0,3 et 0,5 comme c'est le cas à l'intérieur du terrain de soccer situé la zone d'échantillon (encerclé rouge). Cette différence marquée du NDVI pour les surfaces gazonnées apparait être directement liée à la variation de la quantité d'humidité (stress hydrique) présente dans la végétation. Ainsi, ce manque d'eau engendre une diminution de l'activité chlorophyllienne et affecte le verdoisement de la plante. Dès lors, les végétaux ayant un contenu en eau plus élevé et présentent un indice NDVI également plus élevé.

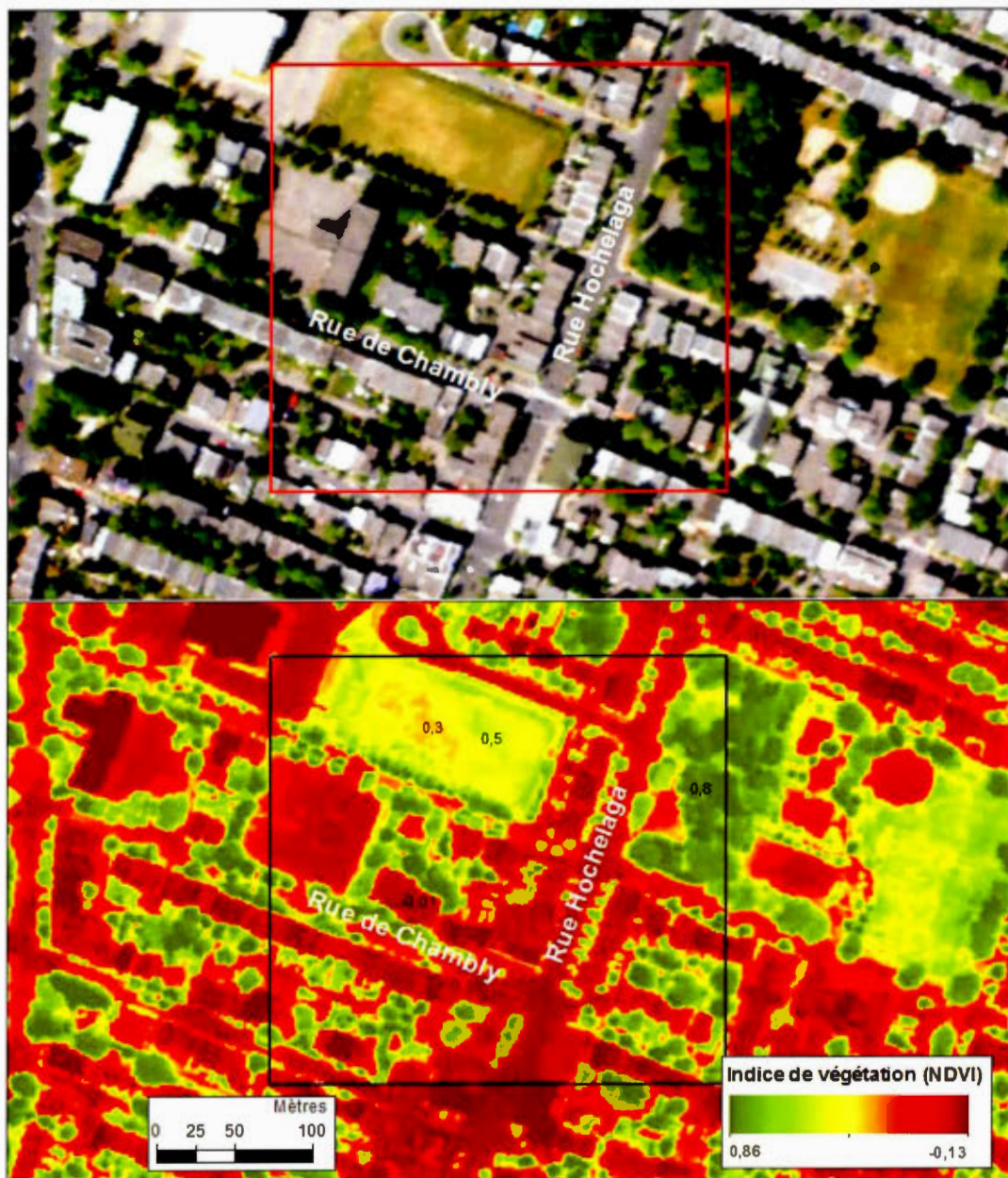


Figure 3.2 Représentation de la cartographie de l'indice de végétation NDVI et de l'image RGB. L'encadré représente la zone d'extraction utilisée pour l'échantillonnage des données. On remarque que les surfaces dépourvues de végétation sont en rouge. On retrouve en rouge les surfaces non végétales et en vert la végétation.

3.3 Présentation des cartes thermiques de jour et de nuit de la zone d'étude

Cette section présente les valeurs de températures mesurées par le capteur TABI-1800 lors du survol de jour et celui de nuit. Une analyse la répartition spatiale de la variation des températures sera aussi présentée. Comme il a été mentionné préalablement, l'analyse des températures de surface a été focalisée sur un espace restreint afin de minimiser l'effet du changement de température généré par la variation de l'intensité et du rayonnement solaire et de la déperdition de chaleur (plusieurs minutes entre le début et la fin de l'aéroportée).

3.3.1 La cartographie thermique des surfaces de jour

Pour l'ensemble de la zone d'étude, les valeurs de température enregistrées s'échelonnent de 14 °C (bleu) à 44 °C (rouge). De prime abord, l'analyse de la carte thermique de jour (Figure 3.3) expose explicitement la variation de la température des diverses surfaces. De manière générale, on constate que les surfaces minéralisées s'avèrent plus chaudes et, inversement, les surfaces végétalisées sont les plus fraîches. Bien que l'image thermique renferme une quantité astronomique d'information, quatre groupes de types de bâti se distinguent par leurs températures relativement homogènes soit les toitures, le réseau routier, les arbres et les espaces gazonnés.

3.3.2 Les immeubles et leurs toitures

À quelques exceptions près, les toitures goudronnées des immeubles, alignées sur un axe orienté nord-ouest/sud-est, sont les objets au sol ayant les températures les plus élevées (± 40 °C) (Figure 3.3 a.). Or, bien que les toitures soient relativement similaires dans leurs formes et dans leurs teintes, on remarque une variation de température à l'intérieur d'une même toiture, mais également d'une toiture à l'autre. Cette différence se chiffre à environ 5 à 6 °C. Ainsi, sur l'ensemble des toitures, on note la présence de points froids (sortie des systèmes de ventilation) et, dans certains

cas, (principalement des toitures en pente) des portions de toits où la température est plus chaude (figure 3.3 a.).

Par ailleurs, une autre caractéristique notable est la présence d'ombres projetées à l'est des bâtiments qui, dans certains cas, atteignent plusieurs mètres touchants principalement le réseau routier. Fait à noter, en certaines occasions, les ombres se confondent avec la végétation à proximité.

3.3.3 Le réseau routier : des rues résidentielles et des artères commerciales

Les routes asphaltées occupent une part importante de la superficie de la zone d'étude. Ces surfaces s'avèrent être les plus chaudes (figure 3.3 b.) avec des températures avoisinant les 30 °C à l'exception des zones ombragées dont la température est significativement plus basse (environ 17 °C). Un aspect important à souligner est que la plupart des tronçons à vocation principalement résidentielle (rues orientées est-ouest et relativement étroites) sont ombragés, ou bien, partiellement recouvertes d'arbres matures. De leurs côtés, les grandes artères routières (orientées nord-sud) étant plus larges et ayant très peu d'arbres de rue sont davantage exposées au rayonnement solaire. Globalement, la température de l'asphalte est pratiquement identique dans la zone d'étude. Les quelques points froids visibles s'avèrent être non pas de l'asphalte, mais bien des automobiles en circulation.

3.3.4 Les arbres matures et leurs ombres projetées

Que ce soit dans les espaces verts (les parcs urbains) ou bien en bordure des rues, les arbres matures, dont la hauteur atteint plusieurs dizaines mètres, occupent une place prépondérante dans l'aménagement du territoire de la zone investiguée. Ils s'avèrent être les objets les plus frais de tout l'ensemble du territoire étudié, avec des températures atteignant près de 18 °C (figure 3.3 c.).

Plusieurs autres points froids sont présents dans la zone d'étude. Ceux-ci sont des surfaces ombragées par des arbres matures ou bien de grands immeubles. De ce

fait, il apparaît logique de mentionner que, bien que cela ne soit pas visible sur la carte thermique, les arbres projettent une ombre sur une part non négligeable des murs des bâtiments se trouvant à l'est de ceux-ci puisque l'aéroportée a eu lieu en après-midi.

Une autre particularité présente, mais non observée par l'imagerie aéroportée dans les secteurs où l'on retrouve une forte densité d'arbres est l'ombre présente sous la canopée. Celle-ci est omniprésente à tout moment de la journée, étant donné l'ampleur de la canopée des arbres. Bien qu'elle ne soit pas mesurée par le capteur thermique, on peut extrapoler que la température de surface sous la canopée est probablement similaire à celle mesurée aux portions ombragées qui sont visibles sur la carte thermique.

3.3.5 Les espaces gazonnés

La presque totalité des surfaces gazonnées se situe dans les parcs urbains. On en retrouve également de part et d'autre dans certains terrains privés. Cependant, ces dernières sont très souvent invisibles sur la carte thermique puisqu'elles sont dissimulées par des bâtiments ou bien par la canopée des arbres. Pour ce qui est de leurs températures, celles-ci sont relativement fraîches par rapport à l'ensemble des surfaces de la zone d'étude et atteignent entre 24 °C et 27 °C. En observant attentivement la figure 3.3.d, on constate la présence de quelques petites zones plus chaudes que l'ensemble de l'herbe. Ces points chauds sont des surfaces dont l'herbe est soit en situation de stress hydrique ou soit partiellement détruite par le piétinement des passants ou des joueurs de soccer (la zone gazonnée est un terrain de soccer).

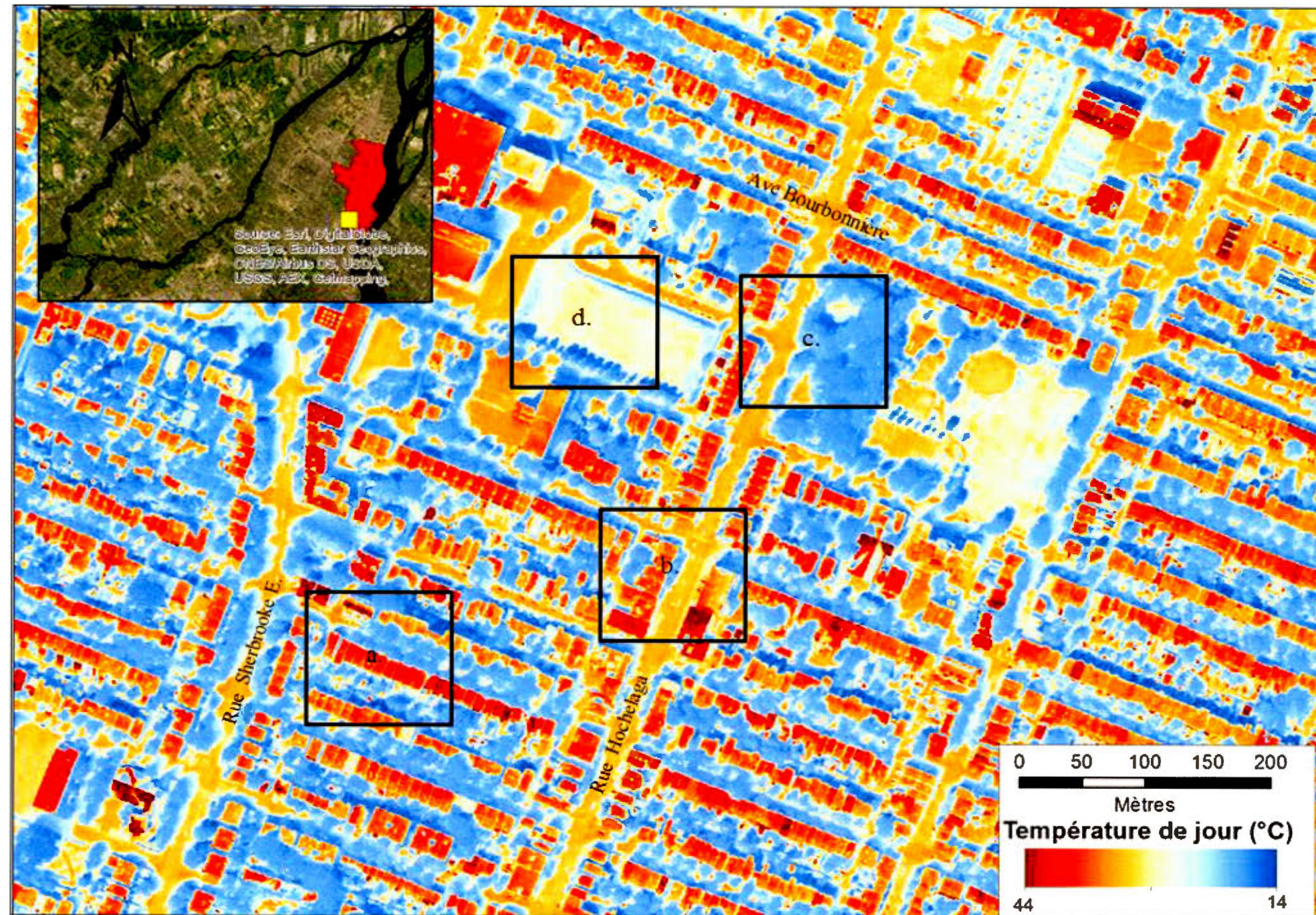


Figure 3.3 Cartographie thermique de surface de jour de la zone d'étude localisée dans l'arrondissement Mercier-Hochelaga-Maisonneuve issue du capteur TABI-1800, 1^{er} septembre 2012, a) exemple de toitures goudronnées, b) exemple de routes asphaltées, c) exemple d'arbres matures, d) exemple de gazon naturel.

3.4 La cartographie thermique de nuit de surface

Pour ce qui est de la température de surface nocturne de la zone d'étude (figure 3.4), la température minimale enregistrée lors de l'aéroportée était de 6,7 °C alors que la température maximale était de 16,2 °C. De prime abord, la constatation la plus importante est que le portrait thermique nocturne diffère complètement du portrait thermique diurne.

3.4.1 Les immeubles et leurs toitures

Lorsqu'elles étaient exposées directement au rayonnement solaire, les toitures des bâtiments étaient sans contredit les surfaces les plus chaudes. Cependant, durant la nuit, on assiste à un renversement de situation : les toitures deviennent les surfaces les plus froides de toute la zone d'observation avec une température de près de 7 °C. Également, on constate que la température y est relativement homogène, à l'exception des toitures qui sont munies d'un système de ventilation dont la température est nettement plus chaude. Par ailleurs, même si les toitures représentent les éléments les plus frais de la zone d'étude, il existe tout de même une différence de température de plus ou moins 4 °C entre les toitures les plus froides (7 °C) (Figure 3.4. encadré a.) et les plus chaudes (10 °C) (Figure 3.4. encadré b.). Fait à noter, il apparaît évident qu'il n'y a pas de lien de causalité entre la température de jour des toits et la température de nuit. En d'autres mots, une toiture très chaude le jour ne conservera pas nécessairement une température plus élevée après le coucher du soleil ou inversement sa température ne chutera pas extrêmement rapidement.

3.4.2 Les surfaces asphaltées

Durant la nuit, avec une température atteignant entre 11,5 °C et 16 °C les routes asphaltées sont les surfaces dont les températures apparaissent les plus chaudes. Une caractéristique intéressante à mettre en relief est la variation notable de température du réseau routier. En effet, on remarque que les portions de rue se situant à l'ouest d'un grand bâtiment (Figure 3.4. encadré c.) ou bien celles au centre d'une

intersection routière sont les plus chaudes (Figure 3.4 encadré d.). Pendant le jour, ces mêmes sections n'étaient pas particulièrement plus chaudes que les autres portions asphaltées ce qui laisse présager que ces zones favorisent la rétention de la chaleur dans les matériaux. Inversement, les portions asphaltées qui se localisent dans les grands stationnements et qui ne sont pas délimitées par des immeubles affichent quant à elles les températures les plus faibles de toutes les surfaces asphaltées.

3.4.3 Les arbres matures

D'emblée, la canopée des arbres matures atteint une température nocturne d'environ 12,5 °C. On remarque également qu'une très faible variation de température entre les arbres (Figure 3.4. encadré e.). Durant le jour, si les arbres étaient sans équivoque les surfaces les plus fraîches de toute la zone d'étude, la nuit, ils sont plutôt dotés d'une température médiane par rapport aux autres objets au sol.

3.4.4 Les surfaces gazonnées

Pour leur part, les surfaces recouvertes d'herbe font partie des éléments du cadre bâti les plus frais de la zone d'observation (Figure 3.4. encadré f.) (légèrement plus chaudes que les toitures) avec une température oscillant entre 7,5 °C et 10 °C. Une certaine hétérogénéité dans la température des grandes surfaces gazonnées est clairement visible. Cette variation de température est particulièrement flagrante dans le terrain de baseball situé à l'est de l'image thermique où plusieurs irrégularités thermiques sont visibles. Fait à noter, les parties limitrophes des surfaces gazonnées (limites entre le gazon et l'asphalte par exemple) s'avèrent quant à elles nettement plus chaudes par rapport au reste des surfaces gazonnées avec une différence de température se chiffrant entre 2 °C à 3 °C.

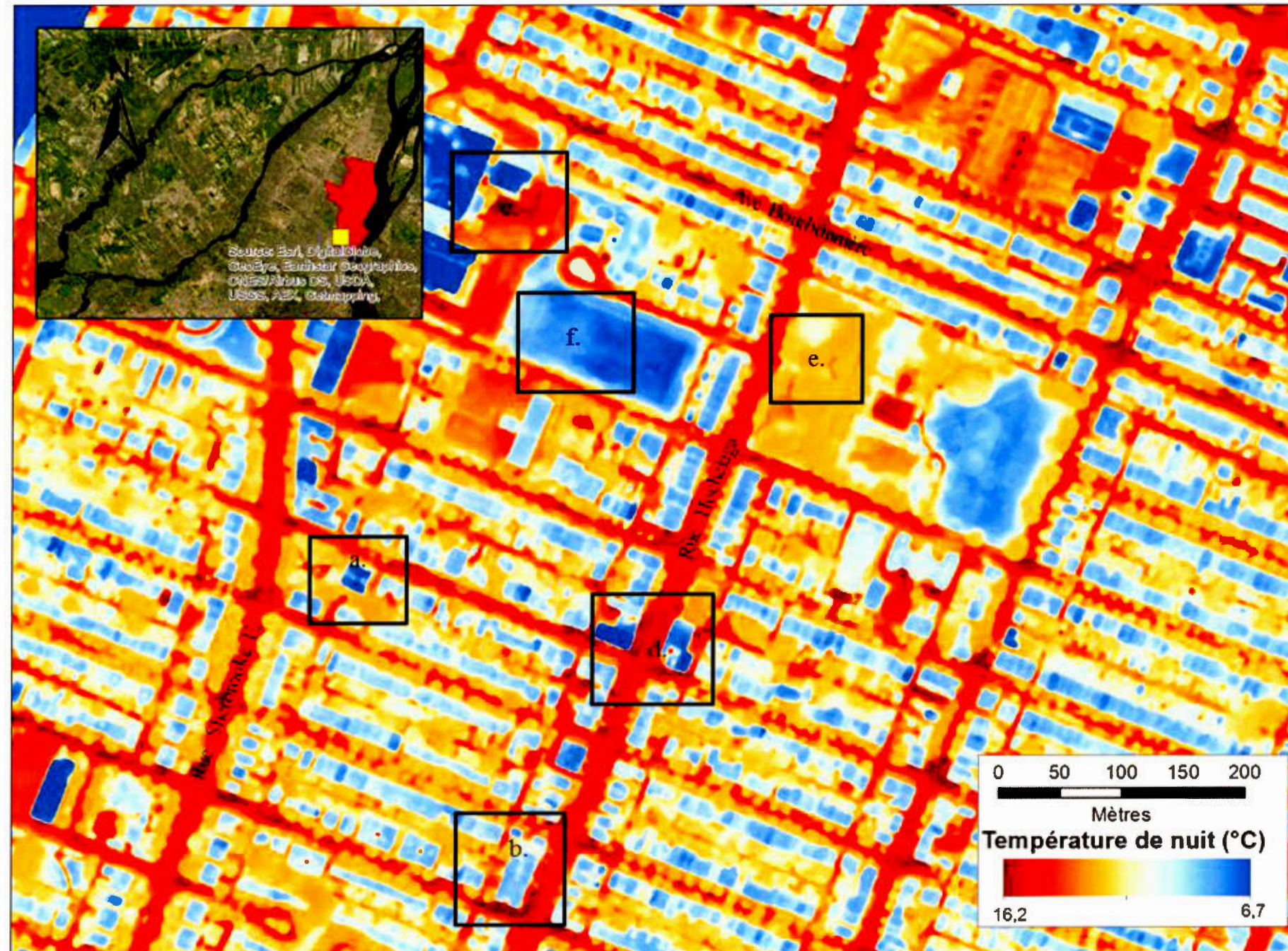


Figure 3.4 Cartographie thermique de surface de nuit de la zone d'étude localisée dans l'arrondissement Mercier-Hochelaga-Maisonneuve issue du capteur TABI-1800, 2 septembre 2012, a) et b) exemples de toitures goudronnées, c) exemple de surface asphaltée encadrée partiellement par un bâtiment à l'ouest, d) exemple d'intersection routier, e) exemple d'arbres matures, f) exemple de gazon naturel

3.5 Évaluation de l'impact de l'albédo des toitures

Cette section porte sur l'analyse du comportement thermique des toitures planes goudronnées noires conventionnelles et les toitures planes réfléchissantes (toits blancs), et ce, dans un contexte urbain, c'est-à-dire dans un milieu où les toitures sont exposées à une quantité variable de rayonnements solaires en termes de durée et d'intensité (présence de grands bâtiments et d'arbres). Par ailleurs, tous les toits montrent quelques signes d'usure (accumulation de saleté, altération de la couleur). Alors, un total de sept toitures de bâtiments de l'arrondissement Mercier–Hochelaga-Maisonneuve sera présenté dans cette section. Celles-ci ont été sélectionnées, car elles possèdent des caractéristiques distinctives et, car elles sont fréquemment répandues dans le milieu urbain. Une fois de plus, l'analyse du comportement thermique diurne et nocturne sera effectuée pour chacun des toits. Dans tableau 3.2, les statistiques descriptives de base (moyenne, minimum, maximum) ont été compilées afin de faciliter la comparaison des valeurs de toutes les toitures. Puis, une représentation tridimensionnelle (tirée de *Google Earth*) des toitures (figure 3.5) a été réalisée afin de présenter leur albédo et le contexte dans lequel elles se situent. Enfin, la figure 3.6 et la figure 3.7 illustrent les portraits thermiques diurnes et nocturnes.

3.5.1 Les toits goudronnés à faible albédo

3.5.1.1 Le toit noir n1

Le toit n1 est situé sur un bâtiment relativement isolé. Les autres immeubles à proximité ne sont pas suffisamment élevés pour lui faire de l'ombre à n'importe quel moment du jour. Pour ce qui est de son aspect visuel, cette toiture est d'un noir très foncé et la teinte est homogène (figure 3.5 n1).

Tableau 3.2 : Synthèse des valeurs statistiques descriptives des sept toitures investiguées

	Identifiant	b.1	b.2	b.3	n.1	n.2	n.3	n.4
	Type	toit blanc	toit blanc	toit blanc	toit noir	toit noir	toit noir	toit noir
	Obstacle	aucun	arbre/ouest	aucun	aucun	aucun	aucun	arbre/creux
Température de jour (°C)	Moyenne	25,8	23,8	30,9	42,4	37,5	33,1	35,8
	Minimum	19,9	19,3	27,3	32,2	32,6	24,3	25,1
	Maximum	27,5	29,0	35,7	44,4	42,9	36,3	39,5
	Étendue	7,6	9,7	8,4	12,2	10,2	12,0	14,4
Température de nuit (°C)	Moyenne	7,2	7,0	6,6	6,8	8,2	11,0	8,6
	Minimum	6,4	6,1	6,3	5,9	7,7	9,0	7,9
	Maximum	9,0	9,7	7,8	10,2	11,7	12,3	11,2
	Étendue	2,6	3,6	1,4	4,4	4,1	3,2	3,4

Durant le jour, la température de surface est relativement homogène sur tout le toit (figure 3.6, n1). Seulement un point plus froid est visible dans la partie est du toit. Cette portion plus froide s'avère une sortie d'aération. La température moyenne mesurée est de 42,4 °C alors que la valeur la plus froide est de 32,2 °C et la température la plus chaude est de 44,4 °C.

La nuit, la chaleur du toit est répartie uniformément (figure 3.7, n1), à l'exception d'une petite superficie légèrement plus chaude située dans la partie est du toit. Pour l'ensemble du toit, la température moyenne est de 6,8 °C. La température la plus faible mesurée est de 5,9 °C et la température la plus chaude est de 10,2 °C.

3.5.1.2 Le toit noir n2

Le toit n2 se trouve sur un immeuble de grande superficie. Comme on peut l'observer, c'est une toiture complètement goudronnée de couleur. On retrouve au centre, une portion qui apparaît être plus foncée (figure 3.5, n2). On note la présence

d'arbres situés à quelques mètres à l'ouest de la toiture et légèrement plus élevés. Toutefois, leur taille n'était pas suffisante pour ombrager la toiture lors du vol.

Le jour, la température est sensiblement la même sur toute la surface (figure 3.6, n2). On remarque cependant que la lisière qui délimite le mur du côté nord est légèrement plus chaude. Fait à noter, la portion du toit qui est de couleur plus foncée n'est pas pour autant plus chaude contrairement à ce qu'on aurait pu présager. La température moyenne enregistrée sur le toit est de 37,5 °C tandis que la valeur minimale mesurée est de 32,6 °C et la valeur maximale est de 42,9 °C.

Pour ce qui est du comportement thermique de nuit, la température y est également homogène (figure 3.7, n2). Aucun point chaud n'est visible sur le toit. La température moyenne de surface est de 8,2 °C et la température minimale est de 7,7 °C et la température maximale est de 11,7 °C.

3.5.1.3 Le toit noir n3

Le toit n3 est construit sur le bâtiment adjacent du toit n2. On constate que ce dernier partage un revêtement très semblable au toit précédent. Par contre, en observant la figure 3.5, n3, il est possible de constater que la teinte n'est pas homogène. En effet, il y a plusieurs portions du toit dont l'albédo est plus faible. Par ailleurs, on note la présence de deux sorties d'aération au centre et à l'est du toit. Quant au milieu environnant, aucun obstacle à proximité n'est suffisamment élevé pour faire de l'ombre sur le toit.

Le jour, la température de surface est répartie uniformément sur tout le toit, à l'exception des sorties d'aération dont la température est nettement plus fraîche (points froids) (figure 3.6, n3). Fait intéressant, malgré qu'il y ait la présence de portion de toiture avec un plus faible albédo, on ne remarque aucune variation de température à ces mêmes endroits. La température moyenne est de 33,1 °C alors que

la température la plus basse est de 24,3 °C et la température la plus haute est de 36,3 °C.

La nuit, on observe que la température du toit est visiblement moins homogène. En fait, plusieurs variations de température sont visibles (figure 3.7, n3). Plus précisément, la partie ouest de la toiture apparaît plus chaude de 2 à 3 °C de plus que la partie est. De manière générale, la température moyenne enregistrée du toit est de 11 °C et les valeurs oscillent entre 9 °C et 12,3 °C.

3.5.1.4 Le toit noir n4

Le toit n4 est construit sur un immeuble de 2 étages. Celui-ci est bordé à l'est et à l'ouest par deux bâtiments plus grands (3 étages) et au sud (sud-ouest) par quelques arbres matures avec une canopée très développée de sorte que le toit n'est plus exposé aux rayonnements solaires bien avant le coucher du soleil (figure 3.5, n4). Cinq sorties d'aération, légèrement surélevées sont présentes sur le toit.

Pendant le jour, plusieurs variations de température à la surface du toit sont notables (figure 3.6, n4). D'une part, sur la section nord-est (tout près du mur de l'immeuble agacent), on retrouve les températures les plus élevées. Inversement, au sud-ouest du toit, deux sections nettement plus froides. Cette baisse de température est occasionnée par la présence des arbres qui bordent le bâtiment au sud-ouest et qui projettent une ombre. Un autre point froid au centre du toit est visible. Il s'agit en fait de la sortie du système de ventilation. Pour ce qui est de la température moyenne, celle-ci est de 35,8 °C. La température minimale mesurée est de 25,1 °C tandis que la température maximale est de 39,5 °C.

Pendant la nuit, la température de surface apparaît significativement plus homogène (figure 3.7, n4). À l'endroit où se situaient les points chauds le jour, aucune différence de température n'est visible. C'est également le cas pour les parties du toit qui étaient ombragées : aucune variation de température n'est perceptible. Le

seul point légèrement plus frais du toit se localise à l'est du toit. Il était d'ailleurs présent durant le jour. Il s'agit vraisemblablement d'une autre sortie de ventilation. Globalement, la température moyenne de surface est de 8,6 °C et la température minimale est de 7,9 °C et la température maximale est de 11,2 °C.

3.5.1.5 Le toit réfléchissant b1

Le toit blanc b1 surmonte un bâtiment de trois étages et est bordé par deux autres immeubles (figure 3.5, b1). Toutefois, dans les deux cas, ceux-ci sont soit de la même hauteur ou moins haut d'un étage et donc ne sont pas en mesure de l'ombrager. Une autre caractéristique pertinente à mettre en relief est la présence de plusieurs taches noirâtres et grisâtres réparties en plusieurs endroits sur le toit. Celles-ci semblent être des accumulations de saleté et de poussière.

Le jour, la température de surface est, somme toute, répartie uniformément sur le toit (figure 3.6, b1). Ainsi, les parties du toit noircies par la saleté semblent avoir très peu d'effet sur la température. En comparant avec les toits avoisinants goudronnés, on constate que le toit blanc demeure définitivement plus froid lorsqu'il est exposé aux rayonnements solaires. La température moyenne de ce toit est de 25,8 °C alors que la température minimale est de 19,9 °C et la température maximale est de 27,5 °C.

La nuit, la température de surface diminue sur tout l'ensemble du toit (figure 3.7, b1). Deux zones seulement apparaissent sensiblement plus fraîches vis-à-vis les sorties de système de ventilation. Pour ce qui est de la moyenne de température, celle-ci est de 7,2 °C et la température minimale est de 6,4 °C et la température maximale est de 9 °C.

3.5.1.6 Le toit réfléchissant b2

Le toit blanc b2 est limité à l'est et à l'ouest par des bâtiments de même hauteur (2 étages) et donc ne bloque en aucun moment du jour le rayonnement solaire (figure 3.5, b2). Par contre, au sud-ouest on retrouve plusieurs grands arbres qui, du coup, projettent une ombre sur le toit en fin de journée.

Pendant le jour, on remarque que le toit demeure très frais par rapport aux autres toits plats aux alentours (figure 3.6, b2). Fait à souligner, le toit adjacent à l'est est aussi un toit blanc, mais il est considérablement plus chaud. Le seul point chaud de la surface est la sortie du système d'aération qui était probablement en fonction ce jour. La température moyenne du toit est de 23,8 °C alors que la température minimale est de 19,3 °C et la température maximale est de 29 °C.

Pendant la nuit, le toit ne présente aucun point chaud et sa température est identique à celle du toit blanc avoisinant et à celles des autres toits goudronnés noirs (figure 3.7, b2). À ce qui a trait à la température moyenne de surface, elle se chiffre à 7 °C tandis que la température minimale est de 6,1 °C et la température maximale est de 9,7 °C.

3.5.1.7 Le toit blanc b3

Le toit blanc b3 est un toit réfléchissant plat standard (figure 3.5, b3). Il est situé sur un bâtiment qui partage un mur mitoyen avec un bâtiment, plus élevé de quelques mètres, sur le côté ouest (nord-ouest). Or, ce dernier étant donné son positionnement et sa hauteur, il n'altère pas la durée d'ensoleillement sur le toit blanc. Deux sorties de ventilation sont présentes sur le toit au centre.

Durant le jour, la température du toit est visiblement plus faible que celui du bâtiment voisin (figure 3.5, b3). Seulement deux points chauds sont présents et ils sont vis-à-vis les sorties d'aérations de l'immeuble. Dans le cas de la moyenne de

température de surface, elle est de 30,9 °C et la température minimale est de 27,3 °C et la température maximale est de 35,7 °C.

Durant la nuit, aucune anomalie thermique n'est visible sur le toit (figure 3.5, b3). Les sorties du système d'aération qui étaient les plus chaudes le jour ont maintenant la même température que le reste du toit. Donc, la température moyenne se chiffre à 6,6 °C alors que la température la plus froide est de 6,3 °C et la plus chaude est de 7,8 °C.

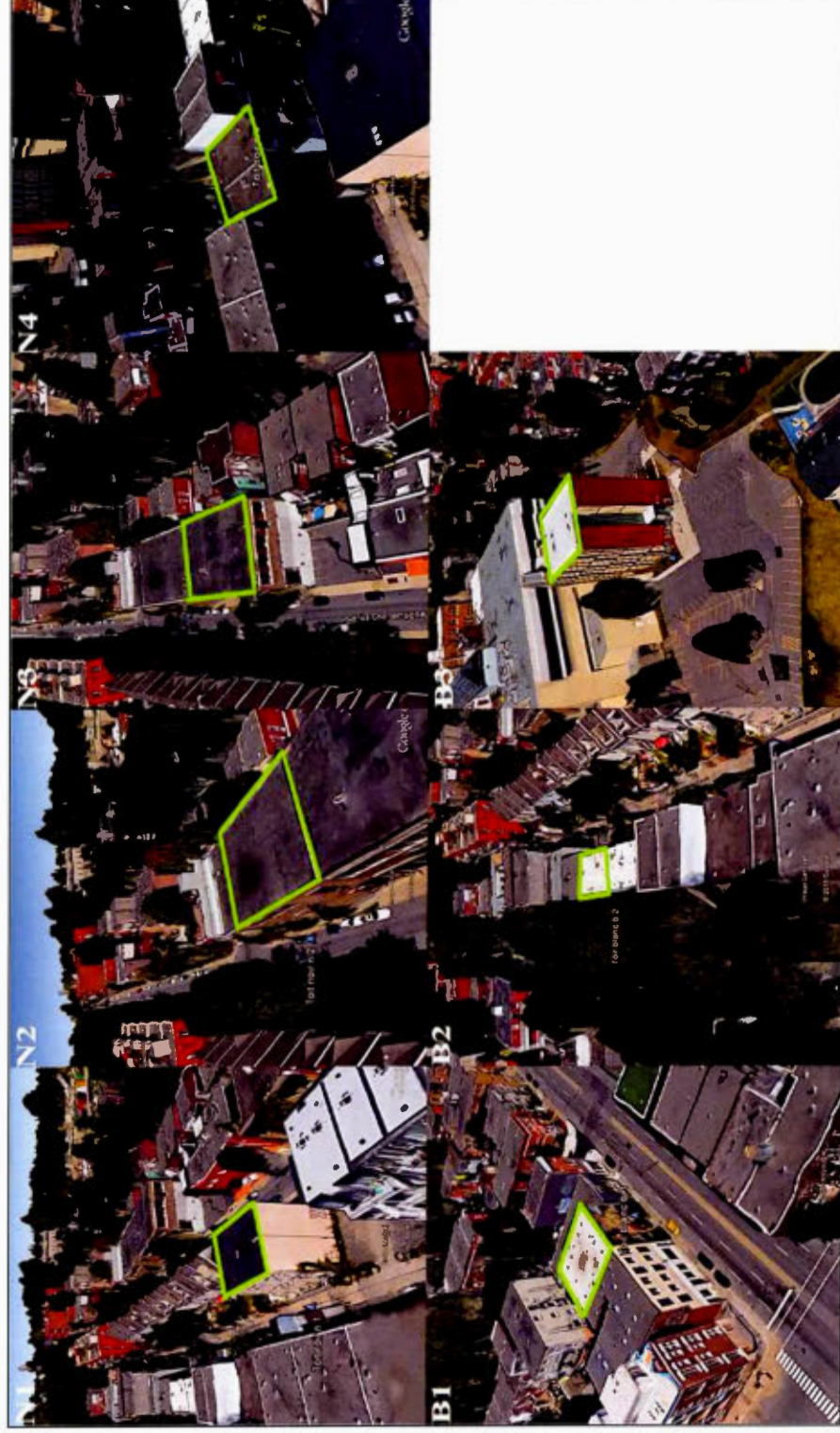


Figure 3.5 Représentation tridimensionnelle des toitures analysées. À noter que la date de la prise d'image qui a servi à la création des bâtiments en 3D, n'est pas exactement la même que celles des aéroportées thermiques de la présente recherche. L'aspect visuel des toitures est légèrement différent de ce qu'il était lors de l'aéroportée. C'est pourquoi ces images sont utilisées uniquement pour mettre en évidence les obstacles qui peuvent entourer les bâtiments. (Source : Google Earth)

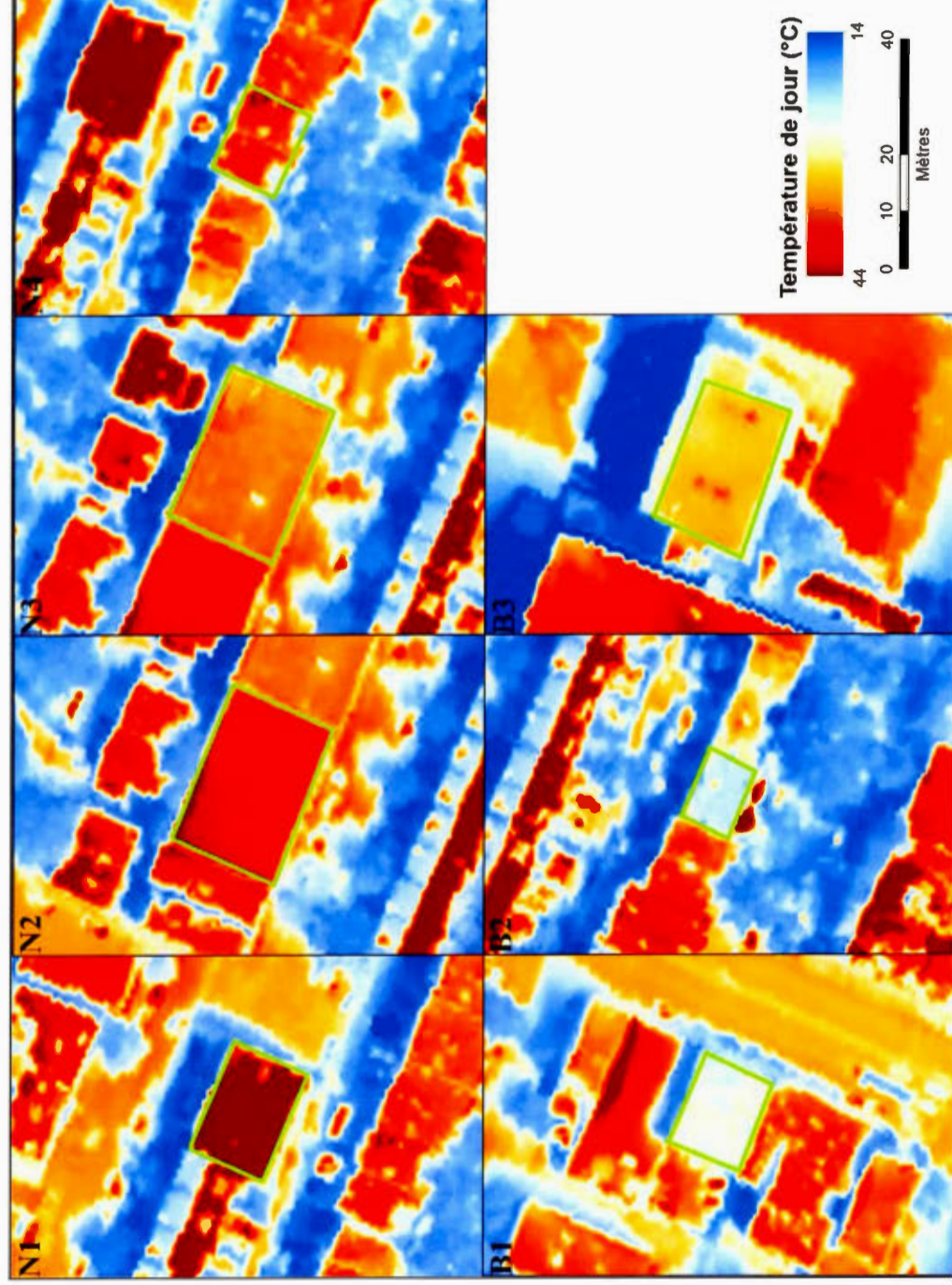


Figure 3.6 Température de surface des toitures durant le jour. Les encadrés verts représentent les toits échantillonnés.

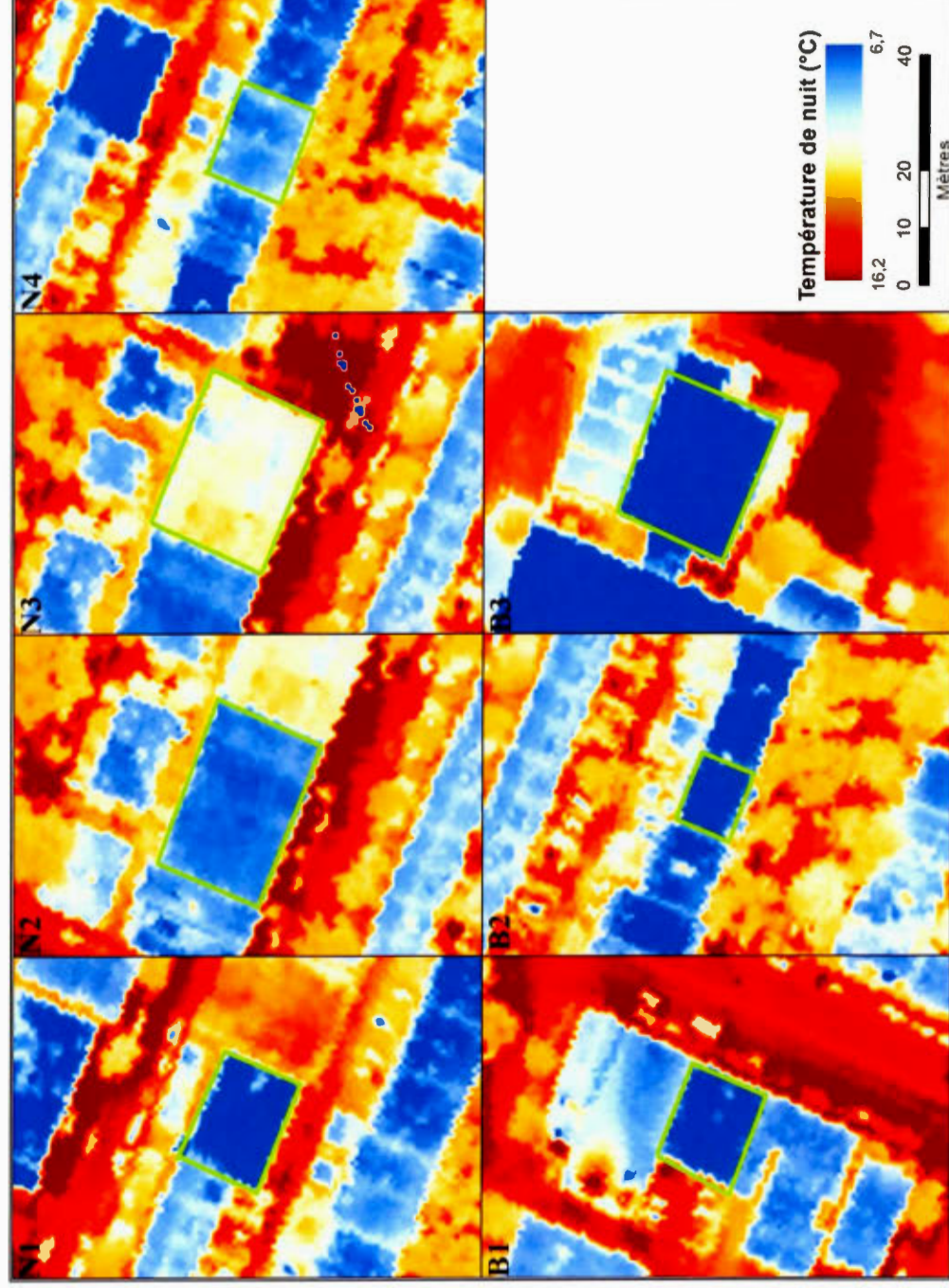


Figure 3.7 Température de surface des toitures durant la nuit. À noter que les points froids (bleus) dans l'image du toit n3 sont en fait des erreurs de température liée à l'image. Les encadrés verts représentent les toits échantillonnés.

3.6 L'évaluation du comportement thermique de trois différents types de surface gazonnée : le gazon artificiel, le gazon naturel et le gazon naturel irrigué.

Trois surfaces gazonnées ont été sélectionnées afin de réaliser une analyse statistique élémentaire ainsi qu'une analyse par photo-interprétation pour observer le comportement thermique de jour et de nuit de ces dernières. Comme pour la section précédente, les valeurs statistiques des trois zones analysées ont été rassemblées dans un seul tableau (tableau 3.3).

Tableau 3.3 : Tableau synthèse des valeurs statistiques des trois surfaces gazonnées investiguées

Identifiant		g.1	g.2	g.3
Type		synthétique	naturel	entretenu
Température diurne (°C)	Moyenne	38,1	27,8	20,2
	Minimum	34,9	24,6	19,1
	Maximum	40,1	30,8	22,7
Température nocturne (°C)	Moyenne	9,2	7,2	9,8
	Minimum	8,6	6,2	9,0
	Maximum	10,2	8,2	11,9

3.6.1 Le gazon synthétique g1

Cette surface gazonnée est utilisée comme terrain de jeu de soccer de l'école secondaire Pierre-Dupuy. Celle-ci est entièrement conçue de matière synthétique (figure 3.8. g1). On remarque qu'au sud-ouest il y a plusieurs arbres matures d'une hauteur de plusieurs mètres qui en fin de journée projette des ombres sur le terrain de jeu.

Durant le jour, la température de surface est uniformément répartie sur l'ensemble du gazon (figure 3.9. g1) à l'exception de quelques points froids. Or, ces

derniers sont en réalité des personnes qui utilisent le terrain de soccer. Un aspect important qui se dégage est que la température du gazon est plus similaire à celle de toitures avoisinantes qu'à celle de la végétation. La température moyenne du gazon est de 38,2 °C alors que la température minimale est de 34,9 °C et la température maximale est de 40,1 °C.

Durant la nuit, le gazon a perdu une grande part de sa chaleur à tel point qu'il fait partie des surfaces les plus fraîches de tout le secteur (figure 3.10. g1). Bien que la température soit très homogène, on remarque que les portions en bordure des arbres demeurent légèrement plus chaudes que le reste du terrain plus éloigné des arbres. Dans le cas de température moyenne, celle-ci est de 9,2 °C tandis que la température minimale est de 8,6 °C et la température est de 10,2 °C.

3.6.2 Le gazon naturel g2

Le gazon g2 s'avère également être un terrain de soccer du collège de Maisonneuve (figure 3.8. g2). Or, contrairement au gazon précédent, celui-ci est recouvert d'herbes naturelles qui doivent être taillées sur une base régulière. Sur le côté sud-ouest, on note la présence de plusieurs arbres matures venant ombrager en partie la surface de jeu. Une autre spécificité de la surface est la présence de petites dénivellations se concentrant dans le centre du terrain et des sections où le gazon a été arraché par le piétinement à répétition des joueurs.

Le jour, la température du gazon est inégalement répartie dans son ensemble (figure 3.9. g2). Si quelques zones sont légèrement plus chaudes, l'ensemble du terrain de soccer est considérablement plus frais que le terrain de gazon synthétique et les toitures des bâtiments à proximité avec une température moyenne de 27,8 °C. Pour ce qui est des valeurs extrêmes, la température minimale est de 24,6 °C et la température maximale est de 30,8 °C.

La nuit, la température de surface est très similaire d'un bout à l'autre du terrain (figure 3.10. g2). Cependant, on note une zone sensiblement plus chaude située dans la partie nord-ouest du gazon. Aussi, une fine section du gazon qui se localise au pourtour du terrain à proximité de la lisière d'arbres est également légèrement plus chaude. En ce qui concerne la température moyenne de surface, celle-ci est de 7,2 °C. La température minimale enregistrée est de 6,2 °C et la température maximale est de 8,2 °C.

3.6.3 Le gazon naturel et irrigué g3

Le gazon g3 est en fait un terrain de soccer professionnel (figure 3.8. g3). On remarque que ce gazon est implanté dans un stade. On peut percevoir que la surface de jeu, bien que celle-ci soit recouverte uniquement de gazon naturel, est très uniforme et sans aucune altération de la surface comme c'est le cas pour le gazon précédent. Par ailleurs, les estrades entourant la surface de jeu, d'une hauteur de plusieurs mètres, réduisent obligatoirement le nombre d'heures d'exposition aux rayonnements solaires en matinée et en fin de soirée sur une part importante de la surface gazonnée.

Durant le jour, la température de surface est presque identique sur toute la superficie (figure 3.9. g3). Puis, sa température est similaire à celle des arbres matures avec une température moyenne de 20,2 °C et une température minimale de 19,1 °C et une température maximale de 22,7 °C.

Durant la nuit, on remarque quatre grands motifs circulaires qui se localisent dans la partie sud du terrain et qui façonnent le portrait thermique de manière particulière (figure 3.10. g3). Il s'agit en fait du système d'irrigation qui projette de l'eau. Cela a comme conséquence d'augmenter légèrement la température du gazon où il y a surabondance d'eau. Bien que moins prononcées, ces formes circulaires sont aussi visibles dans la partie nord du terrain. Puis, dans la partie sud, on note la présence de trois points plus chauds. Ceux-ci s'avèrent être un surplus d'eau causé par le

chevauchement du système d'irrigation. Dans le cas de la température moyenne de surface, celle-ci se chiffre à 9,8 °C tandis que la température minimale est de 9 °C et la température maximale est de 11,9 °C.

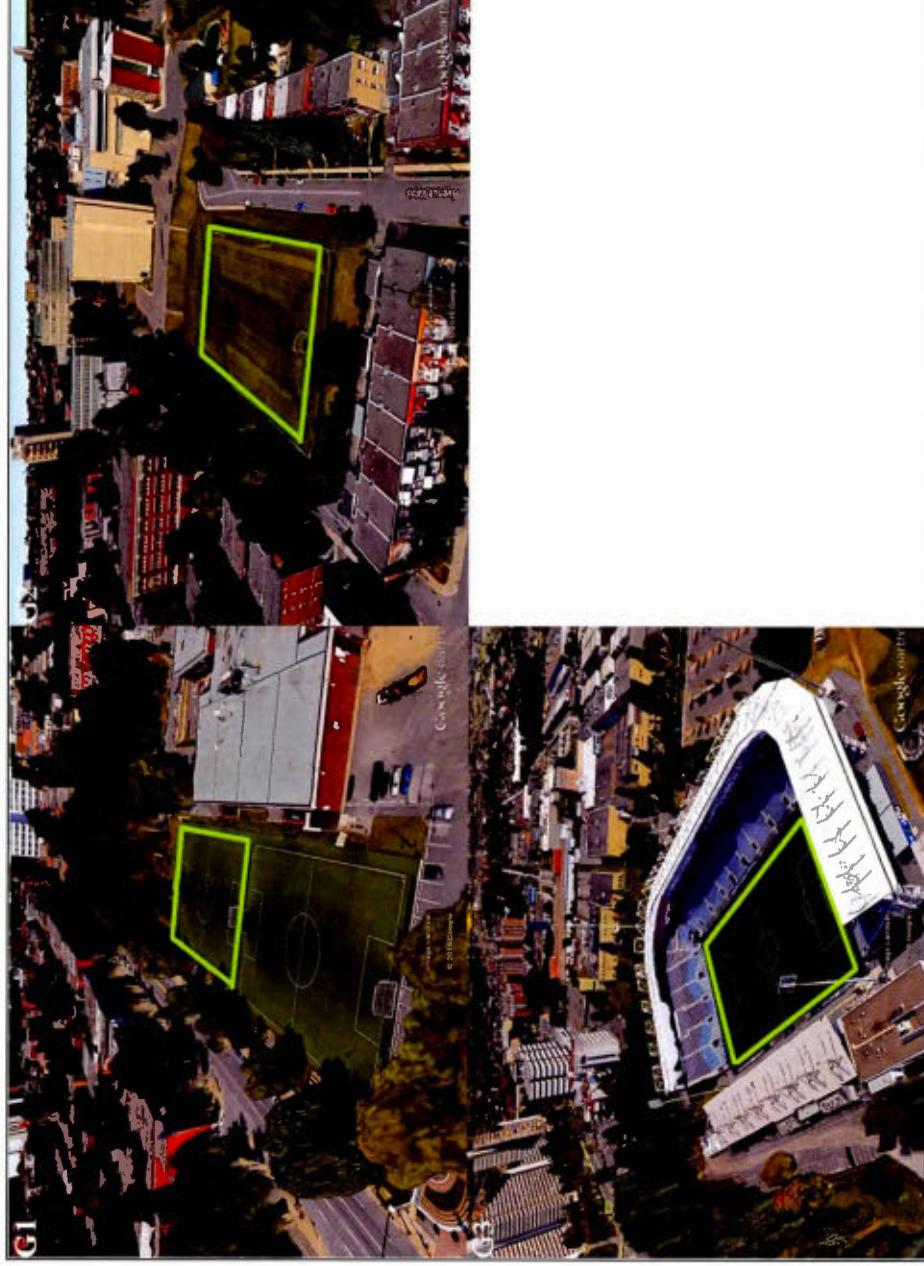


Figure 3.8 Représentation tridimensionnelle des gazon. g1) Terrain de soccer en gazon artificiel (école secondaire Pierre-Dupuy). g2) Terrain de soccer en gazon naturel (collège de Maisonneuve). g3) Terrain de soccer entretenu (Stade Saputo). À noter que la date de la prise de l'image qui a servi à la création des bâtiments en 3D, n'est pas exactement la même que celles des aéroportées thermiques de la présente recherche. (Source: Google Earth)

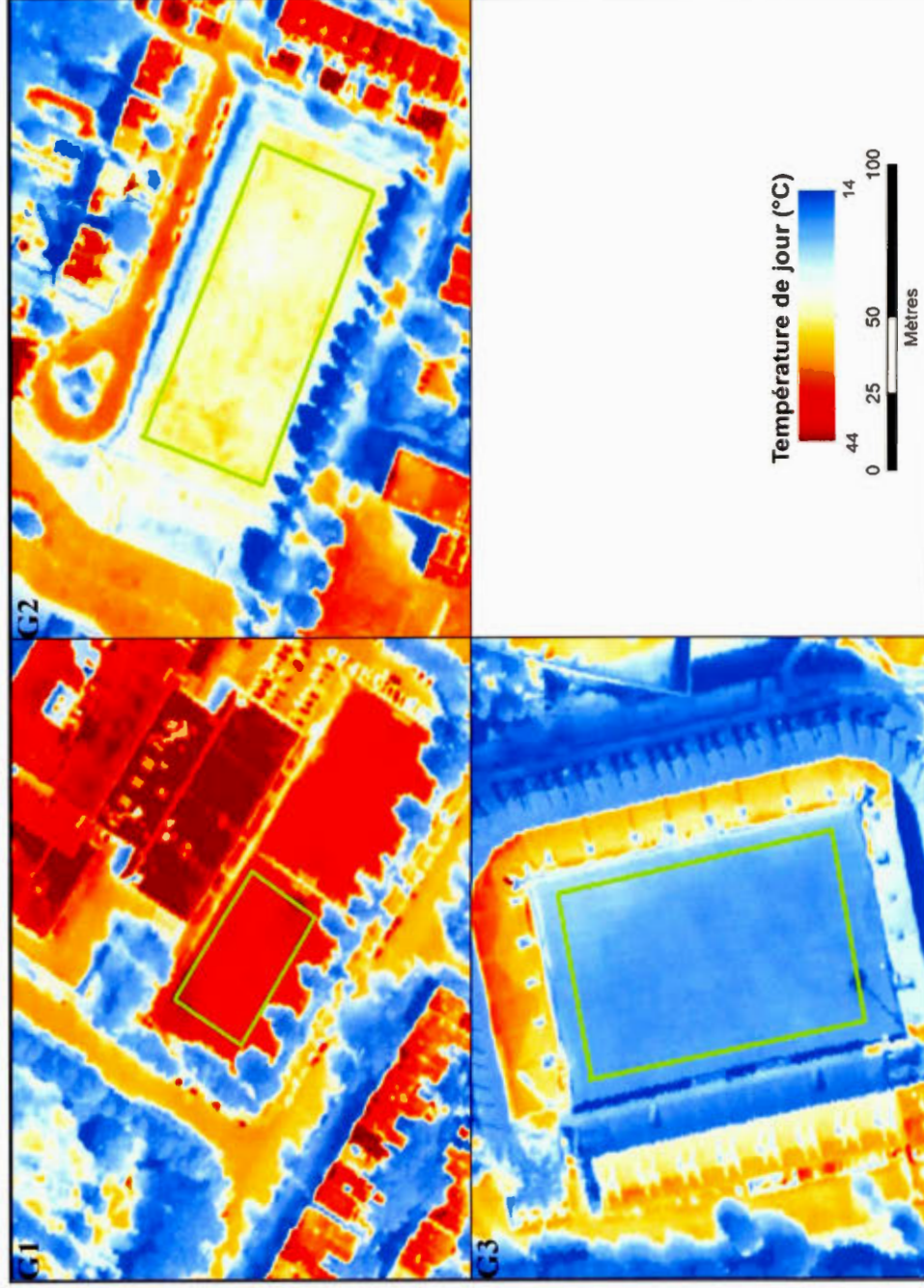


Figure 3.9 Température de surface de jour des surfaces gazonnées. Les encadrés verts sont les zones échantillonnées. g1) Terrain de soccer en gazon artificiel. g2) Terrain de soccer en gazon naturel. g3) Terrain de soccer entretenu (Stade Saputo).

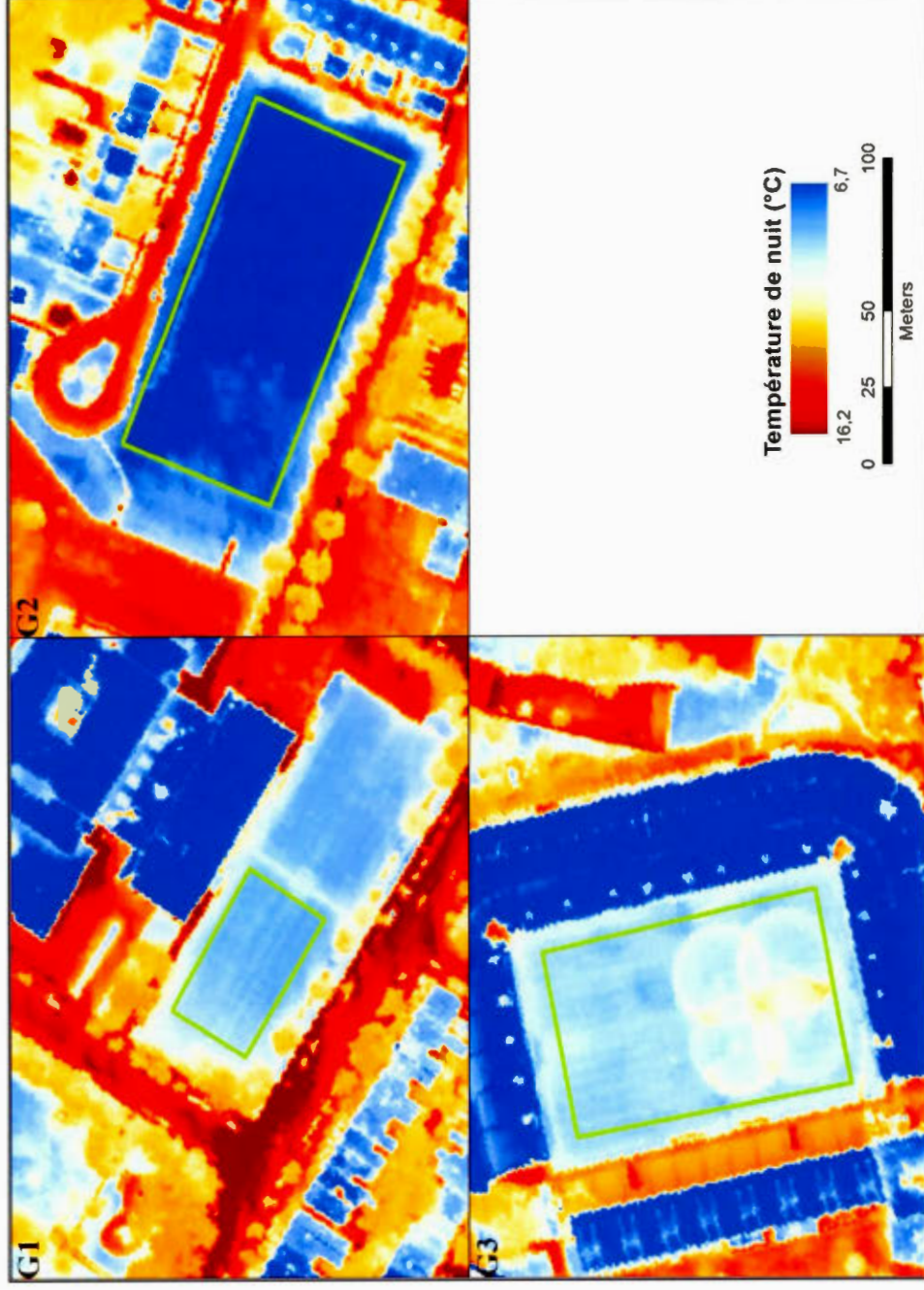


Figure 3.10 Température de surface de nuit des surfaces gazonnées. Les encadrés verts sont les zones échantillonnées. g1) Terrain de soccer en gazon artificiel. g2) Terrain de soccer en gazon naturel. g3) Terrain de soccer entretenu (Stade Saputo).

3.7 Analyses statistiques des variables influençant la température des surfaces

À partir de la zone échantillonnée, une analyse statistique a permis de valider certains facteurs influençant la température de surface observable à partir de la télédétection. Il apparaît important de rappeler que pour éviter une surreprésentation de l'une des quatre classes thématiques (herbe, arbres, bâti, surface blanche) développées auparavant, chacun des graphiques ci-dessous contient une quantité égale de pixels pour chacune des classes. Donc, pour chaque graphique, on retrouve 175 pixels d'« herbe », 175 pixels d'« arbres », 175 pixels de « bâti » et 175 pixels de « surface blanche » ce qui fait en sorte que tous les graphiques contiennent un total de 700 pixels.

3.7.1 L'influence de la végétation NDVI sur les températures de surface de jour

Le premier facteur examiné est l'impact de la présence de la végétation (ou son absence) sur la température de surface grâce à l'indice de végétation NDVI. Dans un premier temps, la figure 3.11 met en relation l'indice NDVI et la température de surface de jour. En observant la répartition des valeurs du graphique, on remarque le fort lien corollaire existant entre les deux variables. Le tout est confirmé par le coefficient de détermination (R^2) qui est de 0,74. Ce coefficient, somme toute, très élevé montre de manière significative que la température de surface diurne est fortement influencée par la présence accrue de végétation. Ainsi, les surfaces ayant un NDVI élevé (arbres et herbes) tendent à avoir une température plus fraîche que les surfaces dépourvues complètement de végétation (asphalte et béton). Il est intéressant de noter la présence de petits groupes de pixels marginaux (résidus) par rapport à la ligne de tendance centrale. Pour le premier regroupement, les pixels partagent comme similitude un faible NDVI ($\pm 0,0$) et une température peu élevée. Ces pixels s'avèrent être des toitures réfléchissantes. Dans le deuxième cas, les pixels ont comme caractéristiques un faible NDVI ($\pm 0,0$) et les valeurs de température les plus chaudes

de l'échantillon. Dans ce cas, ce groupement de pixels représente des toitures goudronnées noires.

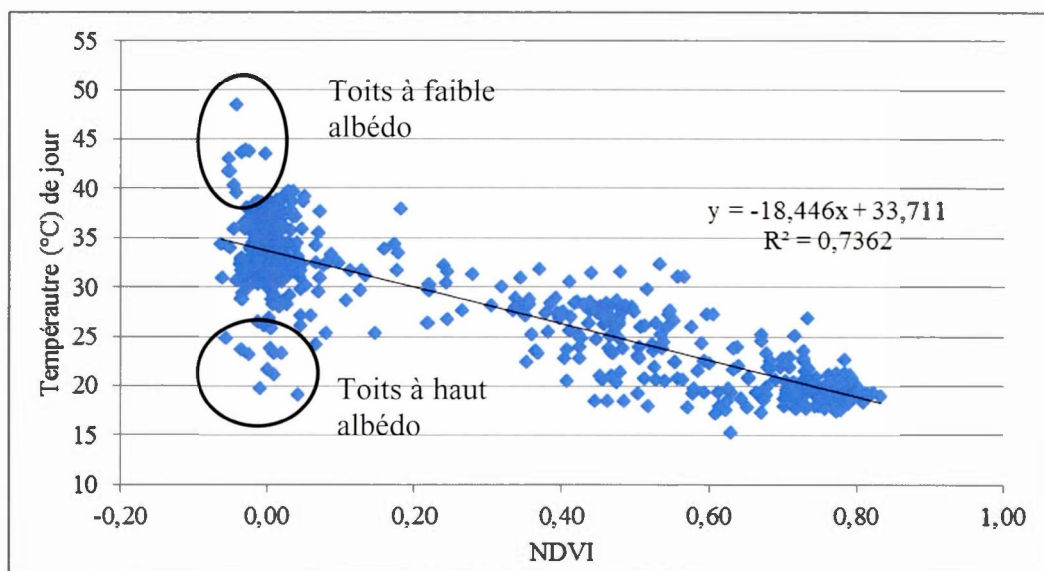


Figure 3.12 Relation entre l'indice de végétation NDVI et la température de surface diurne

3.7.2 L'influence du NDVI et la température de surface nocturne

Si la corrélation entre le NDVI et la température diurne apparaît irrévocable, celle-ci entre le NDVI et la température nocturne semble, quant à elle, inexistante. En effet, en observant la figure 3.12 qui met en relation le NDVI et la température de surface nocturne, on observe que les valeurs ne suivent en aucun cas la courbe de tendance centrale et que le coefficient de détermination est nul avec une valeur de 0,0003. Toutefois, on remarque la présence évidente de quatre regroupes distincts de pixels et chacun des regroupements provient de milieux similaires. En effet, le premier groupe dont le NDVI est d'environ 0,0 et la température oscille entre 12 °C et 16 °C tous les pixels ont été prélevés dans des zones asphaltées. Le deuxième groupe ayant un NDVI également d'environ 0,0 et une température entre 6 °C et 11 °C représente des pixels issus de toitures. Le troisième partage des valeurs de NDVI entre 0,3 et 0,6 et

des températures allant de 6 °C et 9 °C. Tous les pixels ont été échantillonnés sur des zones recouvertes d'herbe. Somme toute, le graphique démontre clairement que durant la nuit, la présence de végétation n'est pas une variable pouvant expliquer la différence de température de surface. En d'autres termes, la présence de végétation affecte la température des surfaces seulement lorsqu'elles sont exposées aux rayonnements solaires.

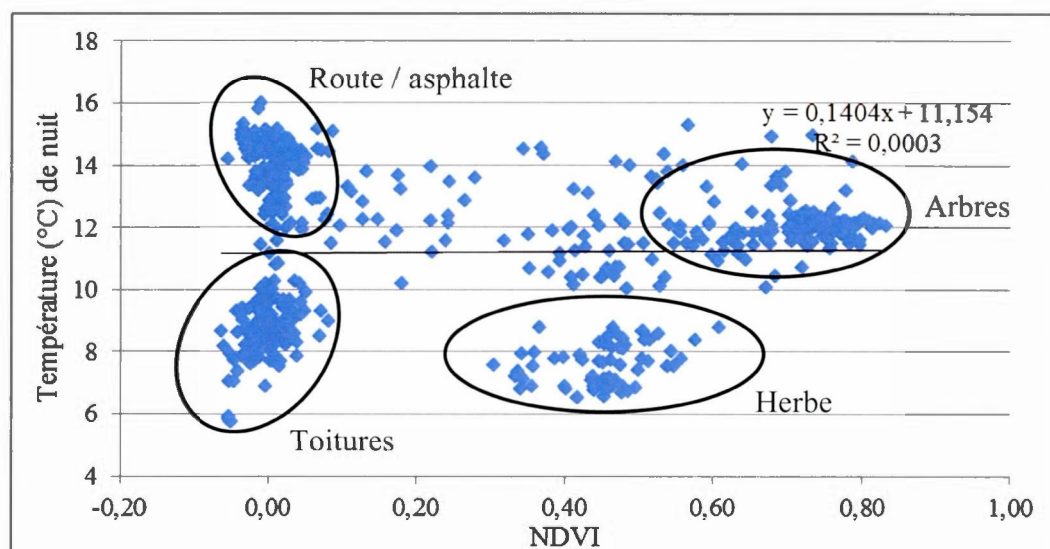


Figure 3.12 Relation entre l'indice de végétation NDVI et la température de surface nocturne

3.7.3 La température de surface de jour et la température de surface de nuit

Le graphique de nuage de points présenté à la figure 3.13 a comme objectif d'évaluer le lien entre la température de surface de jour et la température de surface de nuit. En considérant que le coefficient de détermination est de 0,0344 et la dispersion des valeurs du graphique, on constate l'absence de corrélation entre la température de surface de jour et la température de surface de nuit. Autrement dit, il est possible d'affirmer qu'une température de surface élevée durant le jour n'est pas garante d'une température de surface de nuit élevée.

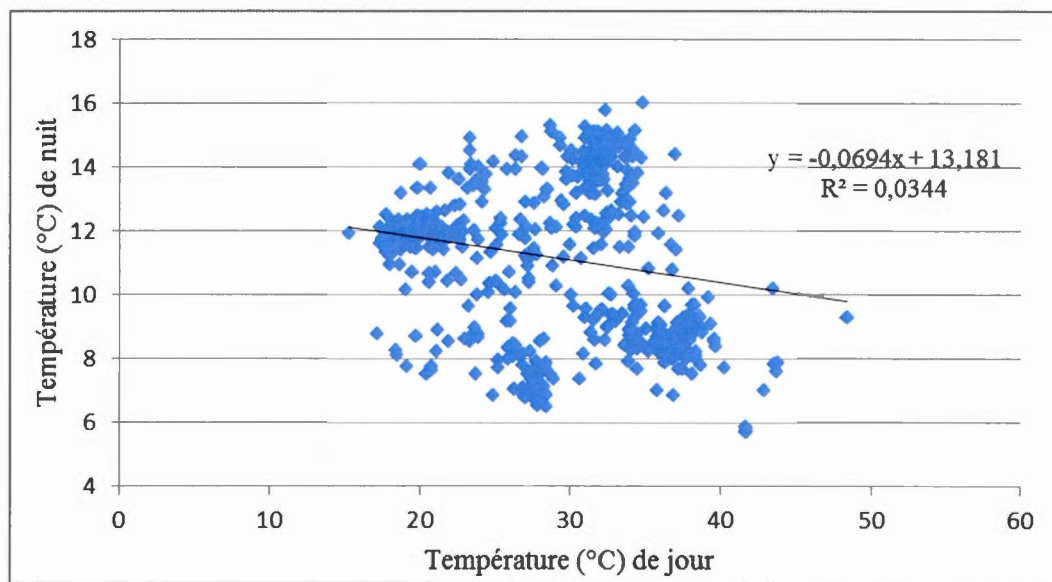


Figure 3.13 Relation entre la température de surface diurne et la température de surface nocturne

CHAPITRE IV

ANALYSE DES RÉSULTATS ET DISCUSSION

4.1 Comportement thermique diurne des surfaces du milieu urbain

Le portrait thermique de jour du milieu urbain étudié démontre bien les divergences d'intensité et de taille des îlots de chaleur de surface diurnes. Il en convient donc que le comportement thermique des surfaces est influencé par des facteurs distincts.

4.1.1 Détermination de l'apport de la végétation sur la température de surface à partir de l'indice de végétation NDVI

À la lumière des résultats obtenus, nous constatons que l'indice de végétation NDVI est un facteur explicatif de la différence de température de surface de jour. En effet, nous avons dégagé la forte corrélation négative (-0,72) entre le NDVI et la température de surface diurne. Ces résultats s'avèrent cohérents avec ceux obtenus par Martin (2008) qui avaient appliqué le même procédé pour l'île de Montréal à partir d'images *Landsat 5*. Celui-ci avait obtenu un R^2 de -0,76. Par ailleurs, plusieurs autres relations entre le NDVI et la température de surface ont été mises de l'avant par diverses études:

- R^2 : -0,84 (Indianapolis, États-Unis), Weng *et al.* (2004)
- R^2 : -0,85 (Wuhan, Chine), Zhang *et al.* (2012)
- R^2 : -0,49 (Beijing, Chine), Li, X. *et al.* (2013)
- R^2 : -0,79 (Milan, Italie), Anniballe *et al.* (2014)
- R^2 : -0,93 (Villes du Nord de l'Italie), Heinl *et al.* (2015)
- R^2 : -0,60 (Téhéran, Iran), Bokaie *et al.* (2016).

La concordance de nos résultats avec ceux de la littérature scientifique démontre bien la justesse de notre méthode d'observation. À noter que la valeur du NDVI est tributaire de l'état de luxuriance et de l'abondance de la végétation (Caloz et Collet, 2001). Cela insinue donc que la végétation dense et verdoyante a une capacité supérieure à maintenir une température plus fraîche durant les journées chaudes et ensoleillées.

L'analyse des valeurs de température de surface nocturne et celle du NDVI a démontré une tout autre constatation : l'inexistence d'une relation corollaire entre les deux variables (R^2 : 0,0003). À partir de ces résultats, il est possible d'affirmer que l'apport de la végétation est un facteur négligeable à considérer pour expliquer la formation des îlots de chaleur de surface nocturne. Pour sa part, Ayanlade (2016) a également affirmé que le lien entre le NDVI et la température de surface de nuit est inexistant. De leur côté, Hamada et Ohta (2010) ont précisé qu'il y a une relation claire entre l'abondance d'arbres matures et la température de l'air le matin, en après-midi et en soirée. Cependant, cette relation est minime la nuit (1h00).

4.1.2 Les types de végétation et les îlots de chaleur urbains

Dans la présente étude, la végétation a été divisée en deux grandes catégories : les arbres et l'herbe. Il a été mis de l'avant que le jour, les arbres étaient les éléments du cadre bâti les plus frais. Ceux-ci tirent leur efficacité à diminuer la température de l'air durant les journées ensoleillées en partie grâce à leur grande capacité d'évapotranspiration (Taha, 1997). Néanmoins, la raison principale pour laquelle cet effet de rafraîchissement est particulièrement élevé provient du fait que la canopée des arbres projette de l'ombre au sol. Par conséquent, les surfaces minéralisées sont protégées du rayonnement solaire direct ce qui limite leur réchauffement (Shashua Bar et Hoffman, 2000; Shashua Bar et Hoffman, 2003). C'est donc dire que c'est principalement les arbres matures munis de grandes canopées qui ont le potentiel d'atténuer significativement la température de l'air.

Selon différentes études, cette diminution de la température de l'air via les espaces végétalisés urbains se chiffre entre 1,7 et 4,6 °C par rapport à leur milieu environnant (Chang et Li, 2014; Hamada et Ohta, 2010; Saaroni *et al.*, 2000; Shashua Bar et Hoffman, 2000; Wang. et Akbari, 2016). Et, le maximum d'efficacité est atteint en après-midi (Shashua Bar et Hoffman, 2000) et en début de soirée (Hamada et Ohta, 2010).

Pour ce qui est des surfaces gazonnées, celles-ci participent au refroidissement de l'air, mais sont nettement moins efficaces que les arbres matures puisque leur capacité d'évaporation est moindre et ne projettent pas d'ombre (Shashua Bar et Hoffman, 2000; Shashua Bar et Hoffman, 2003). Il n'en demeure pas moins que l'implantation de gazon naturel, tout particulièrement lorsqu'il est entretenu régulièrement (arrosé mécaniquement) est une solution nettement plus intéressante que l'implantation de surfaces asphaltées.

Il est pertinent de mentionner que l'herbe se dessèche plus facilement que les arbres étant donné qu'elle n'a pas la possibilité de puiser de l'eau dans le sol à une très grande profondeur. Or, lorsqu'elle est dans un état de stress hydrique, l'herbe perd complètement le peu de son effet rafraichissant. Alors, afin de maximiser son pouvoir rafraichissant, il serait intéressant de veiller à ce que les plantes aient suffisamment d'eau tout particulièrement lorsqu'il y a peu de précipitation.

4.1.3 La portée de la fraîcheur des espaces végétalisés

Le rafraîchissement de la végétation n'est pas seulement quantifiable à l'intérieur même des espaces végétalisés, mais également à leurs pourtours sur une distance relativement restreinte. En effet, selon Hamada et Ohta (2010) et Feyisa *et al.* (2014) le rafraîchissement généré par les parcs urbains n'est perceptible que sur une distance allant de 200 m à 300 m. De leur côté, Shashua Bar et Hoffman (2000) ont mentionné que l'efficacité de rafraîchissement se limitait à une distance de 100 m tout au plus. Sans compter que l'intensité de rafraîchissement s'amointrit en s'éloignant de la

limite des parcs. Cette caractéristique de la végétation souligne l'importance de répartir de manière homogène la plantation d'arbres sur le territoire afin d'atténuer l'intensité des ICU sur l'ensemble du territoire.

4.1.4 Détermination de l'apport des surfaces à haut albédo sur la température de surface

Grâce à la cartographie thermique, il a été possible de constater que les toits blancs (haut albédo) demeuraient significativement plus frais que les toits goudronnés de couleur noire. Cette protection contre la chaleur est possible, du fait que les membranes blanches réfléchissent près de 80 % du rayonnement solaire alors que les membranes noires ont un taux de réflexion d'environ 25 % (Pisello *et al.*, 2016). Ainsi, la majorité du rayonnement solaire atteignant les toits blancs est redirigée vers le ciel plutôt que d'être absorbé et transformé en rayonnement thermique, c'est-à-dire en chaleur (Oke, 1987). Bien évidemment, le pouvoir réfléchissant d'une toiture blanche atteint son maximum lorsque la radiation solaire est le plus intense. Wang et Akbari (2016) ont affirmé que l'écart de température entre les surfaces réfléchissantes et les surfaces plus foncées peut atteindre environ 11 °C. Cette différence de température atteint son maximum entre 11h00 et 14h00. Or, il est intéressant de noter que l'impact sur la température de l'air (entre 3 °C et 4 °C) est quant à lui perceptible sur une plus grande période temps soit entre 8h00 et 19h00. Cependant, comme nos observations l'ont démontré, la saleté et l'usure occasionnées par les intempéries atténuent les propriétés réfléchissantes des toitures de sorte à diminuer leur efficacité thermique. Alors, il serait pertinent de veiller à les nettoyer afin de conserver leur haut taux de réflexion.

Si les surfaces à haut albédo s'avèrent des mesures efficaces pour diminuer la température de l'air, l'ajout de matériaux à haut albédo systématique pourrait être problématique. En effet, lorsque les routes bordées par plusieurs grands bâtiments formant un canyon urbain profond, l'augmentation de l'albédo du pavé devient très

peu efficace, et ce, pour deux raisons. D'une part, le rayonnement solaire est limité en termes de durée et d'intensité et, d'autre part, la part d'énergie solaire qui atteint le sol est redirigée vers les bâtiments et est absorbée par les murs plutôt que d'être réfléchie vers le ciel (Chen *et al.*, 2017; Yang *et al.*, 2015; Yang *et al.*, 2016). Dès lors, pour que l'augmentation de l'albédo du pavé soit une mesure d'atténuation intéressante, elle devrait se limiter aux rues situées dans un environnement « ouvert » (sans bâtiment au pourtour) et aux toitures de bâtiments.

4.1.5 Caractérisation et localisation des îlots de chaleur de surface de jour

La cartographie thermique a souligné que, de manière générale, les toitures noires sont les surfaces les plus chaudes durant le jour. Selon Chen *et al.* (2017) deux différents facteurs sont en grande partie responsables de ces températures très élevées. Tout d'abord, les matériaux utilisés pour recouvrir les toits ont une teinte très foncée (faible albédo) ce qui fait en sorte que presque la totalité du rayonnement solaire est absorbée par le matériau. Ainsi, une plus grande part du rayonnement solaire est disponible pour être réémise sous forme de rayonnement infrarouge (en chaleur). Par ailleurs, les toitures se distinguent des autres surfaces urbaines par leur forte inertie thermique. Cela se traduit par des changements de température rapides. C'est pour cette raison que lorsque le rayonnement solaire est intense, les toitures atteignent des maximums de température élevés dès le lever du soleil. Et, dès que les toitures ne sont plus exposées à la lumière du soleil, la déperdition de chaleur se fait rapidement. Il est intéressant de souligner que d'autres caractéristiques internes de la structure des toitures peuvent influencer la température des toits. En effet, nous avons observé que différentes toitures ayant un albédo presque identique avaient des températures significativement différentes. Cependant, ces caractéristiques ne peuvent être investiguées à partir d'imagerie aéroportée. Pour que ces propriétés soient évaluées, elles devraient faire l'objet à elles seules d'études spécifiques sur la structure des bâtiments.

Une autre nuance pertinente à apporter est la présence de toitures goudronnées noires qui demeuraient très fraîches par rapport aux autres toitures puisqu'elles étaient entourées par un ou plusieurs immeubles plus grands. Cette particularité met en relief le fait que les constructions en milieu urbain par leurs tailles et par leurs emplacements modifient dans certaines situations la quantité de rayonnement solaire atteignant les toitures et donc nécessairement leur température de surface. Alors, dans une perspective d'implantation de mesures d'atténuation, il serait intéressant de privilégier tout d'abord les toits de bâtiments qui ont un potentiel d'exposition aux rayonnements solaires les plus élevés au détriment des toitures de bâtiments partiellement ombragés par des immeubles ou des arbres plus élevés

Ressemblant à de l'herbe, le gazon synthétique était une des surfaces les plus chaudes avec les toitures goudronnées noires. Son comportement thermique était plus similaire à celui des toitures goudronnées noires qu'à celui de gazon naturel. Deux caractéristiques plausibles pouvant expliquer la température élevée du gazon artificiel soit que l'albédo de la surface est faible (vert foncé) et qu'il est constitué de plastique qui est un matériau artificiel empêchant toute forme d'évapotranspiration. De ce fait, le gazon artificiel ne devrait en aucun cas être considéré comme de la végétation et devrait être perçu comme un îlot de chaleur de surface.

Les rues asphaltées font partie des surfaces les plus chaudes durant le jour. Bien que l'asphalte des rues ait également un faible albédo, leurs températures sont demeurées plus fraîches que celles des toits goudronnés. Cette différence de température s'explique possiblement par le fait que l'asphalte des routes possède une inertie thermique plus faible étant donné qu'elle est très dense et épaisse. Par conséquent, le changement de température de l'asphalte se fait plus lentement, et une grande quantité de chaleur est emmagasinée dans le matériau (Chen *et al.*, 2017; Qin et Hiller, 2014). Bien que toutes les rues soient similaires en termes d'albédo et d'inertie thermique, plusieurs zones asphaltées ont été observées avec des

températures de surfaces très fraîches. Cette modification de la température provient de l'ombre portée par les grands bâtiments et les arbres matures qui empêche le rayonnement solaire direct de surchauffer l'asphalte à proximité. Ainsi, il en convient donc que le comportement thermique de l'asphalte, tout comme celui des toitures, est influencé par la rugosité urbaine causée par la présence de bâtiments d'arbres.

4.1.6 Comportement thermique nocturne des surfaces du milieu urbain

L'observation du portrait thermique de nuit a révélé les distinctions existantes entre le comportement thermique de surface de jour et celui de nuit. Deux différences majeures sont perceptibles soit l'intensité réduite des îlots de chaleur de surface et un changement important de la localisation et des sources de chaleur. Néanmoins, plusieurs types de matériau sont identifiés comme étant possiblement problématique.

4.1.7 Caractérisation et localisation des îlots de chaleur de surface de nuit

À l'exception de quelques sorties de systèmes de ventilation, les températures de surfaces les plus élevées ont été observées sur le réseau routier. Contrairement aux membranes recouvrant les toits, l'asphalte est particulièrement performant pour emmagasiner et restituer peu à peu la chaleur, et ce, plusieurs heures après le coucher du soleil. Cette rétention de chaleur s'explique par le fait que ce matériau est dense et épais lui conférant une faible inertie thermique (Chen *et al.*, 2017; Qin et Hiller, 2014; Santamouris *et al.*, 2011; Synnefa *et al.*, 2006). Si ce surplus de chaleur est présent sur l'entièreté du réseau routier, les intersections et les routes dégagées à l'ouest (sans bâtiment ou arbre) ont conservé une plus grande quantité de chaleur. Une explication plausible de la formation de ces points chauds est qu'étant donné leur orientation, il n'y pas d'obstacle pouvant entraver les derniers rayons du soleil de la journée. Dès lors, ces portions de route ont été exposées aux rayonnements solaires sur une plus grande période de temps ce qui aurait fait en sorte que la déperdition se soit amorcée plus tard. Qui plus est, la présence des grands bâtiments en bordure de rue entrave partiellement le mouvement de l'air ce qui participe à la rétention de la

chaleur dans le matériau (Oke, 1981). Ce surplus de chaleur n'est pas anodin. En effet, Schrijvers *et al.* (2015) ont considéré que la présence de grands bâtiments (canyon urbain) est la cause principale des ICU nocturnes.

Inversement, les portions de rue résidentielle avec beaucoup d'arbres de rue affichaient une température légèrement plus faible. C'était également le cas pour les secteurs où l'on retrouvait de grands bâtiments où des arbres situés à l'ouest des rues. Ces portions asphaltées bénéficiaient d'obstacles venant réduire leur exposition aux rayonnements solaires leur permettant ainsi de commencer leur décharge de chaleur plus tôt. Malgré ces quelques variations de température observées, les routes sont néanmoins les principaux îlots de chaleur de surface nocturne.

Une autre caractéristique des surfaces pendant la nuit est la faible température de toutes les toitures. Cette caractéristique est particulièrement évidente en considérant que ces dernières s'avéraient les surfaces les plus chaudes durant le jour. On peut attribuer cette perte drastique de chaleur par leur forte inertie thermique (Chen *et al.*, 2017). Ainsi, les toitures, de par leur dynamique thermique, ne sont pas considérées comme des îlots de chaleur surface nocturnes.

Pour leur part, les arbres ont conservé une température très similaire à celle de jour. Une explication probable de cette faible amplitude thermique est la grande quantité d'eau qui est emmagasinée dans leurs feuilles. Ainsi, l'eau contenue dans les arbres empêcherait les grands écarts de température étant donné que l'eau a une faible inertie thermique. Une autre observation pouvant soutenir cette hypothèse est que les surfaces gazonnées ont pour leur part une plus grande amplitude thermique que celle des arbres. Et l'une des différences majeures entre ces deux types de végétation est que l'herbe contient généralement moins d'humidité.

Cependant, il est important de mentionner que cette rétention de chaleur occasionnée par la couronne des arbres n'est pas suffisante pour qu'elle soit

considérée comme problématique. En effet, Coseo et Larsen (2014) ont affirmé que la présence de matériaux artificiels est la cause principale des ICU nocturnes et non la présence de végétation.

4.2 Recommandations pour l'implantation de mesures d'atténuation selon l'environnement urbain

À partir des connaissances acquises sur la dynamique thermique des surfaces sur le territoire montréalais (secteur résidentiel), une série de recommandations ont été établies afin de maximiser l'effet des mesures d'atténuation des ICU. Ces recommandations ont été basées sur la combinaison de la localisation des surfaces susceptibles d'augmenter la température de l'air et les mesures d'atténuation considérées les plus performantes. À noter l'importance de la pluralité des mesures d'atténuation, car il n'existe pas de solution unique et universelle pour remédier aux phénomènes de ICU. Il est donc impératif de miser sur un ensemble de mesures d'atténuation adaptées aux caractéristiques du cadre bâti des villes (Yang *et al.*, 2015).

- Bien qu'il y ait une relative abondance de végétation sur le territoire montréalais, plusieurs secteurs demeurent complètement dénudés de végétation. Considérant la portée relativement limitée de l'effet rafraichissant des zones végétalisées et qu'il serait intéressant qu'un grand nombre de personnes puissent bénéficier de leur effet rafraichissant, il est nécessaire de planter un plus grand nombre d'arbres. Or, pour étendre au maximum la portée de la fraîcheur dégagée par la végétation, la plantation doit se faire à des endroits stratégiques. Les zones à prioriser sont :
 - Les grandes artères du réseau routier à vocation mixte (ex. la rue Hochelaga)
 - Les intersections des routes

- Les zones à proximité des murs de bâtiments orientés vers l'ouest et vers l'est.
- Le pourtour des terrains de jeu en gazon synthétique.
- Considérant que la chaleur extrême est un risque sanitaire affectant majoritairement les personnes âgées (65 ans et plus) et vivant seules, il serait préférable de prioriser les secteurs à vocation résidentielle et mixte (résidentiel et commercial) où l'on retrouve une part importante de la population avec ce profil socio-économique pour faire l'implantation de mesures d'atténuation. Puisqu'elles sont inhabitées et seulement pratiquées par des personnes qui sont généralement non vulnérables aux chaleurs extrêmes, les zones strictement industrielles et commerciales ne devraient pas être ciblées comme prioritaire par les décideurs publics.
- Considérant que certains secteurs sont peu propices à l'implantation d'arbres, la plantation de plantes grimpantes offre une solution alternative intéressante pour les murs orientés vers l'est et vers l'ouest (l'exposition au soleil de ces murs est la plus forte intense le matin et en fin d'après-midi) (Morakinyo *et al.*, 2013).
- Considérant que la végétation en état de stress hydrique perd une grande part de sa capacité à se rafraichir, il serait important de s'assurer que celle-ci, tout particulièrement le gazon, soit arrosée afin d'optimiser son effet rafraichissant issu du processus d'évapotranspiration.
- Considérant que les arbres mettent plusieurs dizaines d'années pour atteindre leur pleine grandeur, et considérant que ce sont les arbres de grande taille qui possèdent le plus grand pouvoir rafraichissant, il serait pertinent de veiller à leur protection et à leur préservation. Pour y parvenir il serait intéressant de :
 - Inciter la population à planter des arbres par eux-mêmes par l'entremise d'incitatifs financiers, par exemple, des crédits de taxes municipales.

- Informer les citoyen-es via des campagnes de sensibilisation sur l'importance d'entretenir la végétation sur les propriétés privées et sur le domaine public.
- Considérant que les toits blancs atténuent significativement la température durant le jour, il serait pertinent de continuer à favoriser l'implantation de toits blancs afin de diminuer les îlots de chaleur de surface diurnes, mais sous certaines conditions :
 - Prioriser les toitures de bâtiments qui sont les plus exposées aux rayonnements solaires (sans obstacle)
 - Nettoyer la membrane du toit, tout particulièrement près des drains d'évacuation d'eau de pluie, afin de préserver leurs capacités réfléchissantes.

4.3 Considérations méthodologiques

Dans le cadre de cette recherche, nous avons opté pour l'utilisation d'images thermiques et hyperspectrales à haute résolution comme source de données. Notre recherche se voulait principalement exploratoire, c'est-à-dire qu'elle avait comme objectif d'explorer les possibilités qu'offre la télédétection aéroportée pour l'étude des îlots de chaleur de surface. À la suite de cette étude, non seulement plusieurs nouveaux apprentissages ont été découverts, mais également quelques lacunes.

4.3.1 La correction atmosphérique : sous-estimation marquée la nuit

L'absence totale de correction atmosphérique sur les images autant thermiques qu'hyperspectrales est une lacune importante dans la véracité des données obtenues pour cette recherche. En effet, la couche d'air qui sépare le capteur aéroporté et le sol, interfère avec les ondes électromagnétiques qui sont soit réfléchies, absorbées ou bien émises par la surface. L'effet de l'atmosphère, ou plus précisément la vapeur d'eau atténue peu les images hyperspectrales, mais davantage les images thermiques. Cela peut s'expliquer par le fait que le capteur TABI-1800 utilise les ondes

électromagnétiques du proche infrarouge pour mesurer la température des surfaces. Or, ces longueurs d'onde sont fortement absorbées par la présence de vapeur d'eau (Caloz et Collet, 2001). Cette sous-estimation des valeurs de température semble particulièrement importante durant la nuit. En effet, lors de l'aéroportée de nuit, la température minimale de l'air enregistrée à l'aéroport International Pierre-Elilot Trudeau était de 16, 4 °C alors que des températures de surface de 6,2 °C ont été enregistrées de part et d'autre des images thermiques. Cette différence de température d'un peu plus de 10 °C est bien évidemment énorme et très peu probable. Une raison pouvant expliquer cette sous-estimation particulièrement marquée la nuit est que durant une journée chaude et ensoleillée, l'eau sous forme liquide présente à la surface du sol est évaporée en grande quantité. Cela fait en sorte que durant la nuit la concentration en vapeur d'eau dans l'air près de la surface est significativement plus élevée. Donc, le potentiel d'absorption du rayonnement infrarouge par la vapeur d'eau est amplifié. Dans tous les cas, si nous avons appliqué une correction atmosphérique adéquate, les valeurs de température obtenues de jour comme de nuit seraient plus près de la température réelle de surface. Cependant, pour accomplir cette tâche, il serait primordial de réaliser une campagne de terrain. Celle-ci viserait à prendre une série de données thermiques de contrôle réparties sur l'ensemble de la zone d'étude à l'aide d'instruments de mesures portatives tels qu'un thermomètre infrarouge et une caméra thermique. Cette approche offrirait la possibilité d'évaluer la marge d'erreur existant entre la température réelle des surfaces et celle mesurée par le capteur aéroporté. Par ailleurs, ces données pourraient également servir de points de référence pour valider une éventuelle correction atmosphérique comme il a été fait par Wang, H. *et al.* (2011), Savelyev et Sugumaran (2008) et Akbari *et al.* (2003).

Toutefois, il apparait primordial de rappeler que des études ont démontré que la thermographie sans correction atmosphérique offre tout de même des résultats intéressants et fiables, car la distance entre la surface du sol et le capteur aéroporté est

relativement faible ce qui limite l'impact de l'atmosphère (Lo *et al.*, 1997; Pipia *et al.*, 2011).

4.3.2 L'étude des îlots de chaleur de surface à partir de la télédétection : les zones invisibles

Une autre limite de l'observation des îlots de chaleur de surface à partir de la télédétection réside dans le fait que les cartes issues de cette méthode ne représentent non pas exactement la température de surface du milieu urbain, mais bien la température des surfaces « vue » par le capteur (Voogt et Oke, 2003). Cela insinue que plusieurs surfaces demeurent invisibles pour le capteur. Cette perte d'information est d'autant plus importante avec la présence de bâtiments très élevés et d'arbres matures (Lagouarde *et al.*, 2004). Nous avons pu témoigner de ce manque d'information à quelques occasions avec les zones qui se situent à proximité de grands bâtiments (c'est le cas pour les murs aussi) venant entraver le champ de vision du capteur. C'est donc dire qu'en utilisant ce genre de méthode d'observation, il y a toujours une part des surfaces qui demeure indétectable par le capteur. Cette lacune nous a tout particulièrement affectés lorsque nous avons investigué le comportement thermique des toitures des bâtiments. Néanmoins, les images couvraient une très grande majorité des surfaces de la zone d'étude. Une raison pour laquelle, cela a été possible est que nous avons choisi une zone dont les bâtiments étaient relativement peu élevés dans un contexte urbain. Or, comme le mentionnent Sebari et Morin (2010), l'observation du milieu urbain demeure toujours ardue étant donné la complexité et l'hétérogénéité des formes et de la densité des surfaces qui le constituent.

4.4 L'intérêt des images aéroportées thermiques dans les études des îlots de chaleur

Probablement le plus grand avantage des images aéroportées est qu'elles permettent d'analyser très finement le cadre bâti urbain ce qui est impossible de réaliser à partir

d'images satellitaires dont la résolution spatiale est beaucoup trop faible (120 m pour le satellite *Landsat 8*).

Un autre avantage est que l'aéroportée offre une grande flexibilité sur le moment de la couverture. Il est donc possible d'obtenir une thermographie de nuit ce qui ne peut être obtenu à partir des données du satellite *Landsat 8* (pour la région de Montréal, un passage à tous les 16 jours aux alentours de 11h00).

CONCLUSION

L'arrondissement Mercier-Hochelaga-Maisonneuve s'est avéré une zone d'étude idéale pour l'étude du comportement thermique des surfaces en milieu urbain. Comportant certaines limites, notre recherche visait, d'une part, à approfondir nos connaissances sur le comportement thermique des surfaces de la ville de Montréal durant le jour et durant la nuit et, d'autre part, de développer une méthode d'observation des îlots de chaleur de surface à partir d'imagerie aéroportée. La totalité des données de cette recherche a été recueillie par le capteur aéroporté TABI-1800 pour les images thermiques et le capteur aéroporté CASI-1500 pour les images hyperspectrales. L'utilisation de l'imagerie aéroportée a permis de dresser un portrait thermique détaillé des surfaces en milieu urbain qui n'avait jamais été accompli jusqu'à présent sur l'île de Montréal.

Il est nécessaire de rappeler que les cartes thermiques créées dans le cadre de cette recherche ne sont pas des cartes des îlots de chaleur (température de l'air), mais bien des cartographies d'îlots de chaleur de surface (température des surfaces). Donc, ces cartes ne font que localiser les surfaces susceptibles de favoriser la formation des ICU. Ceci dit, notre recherche ne s'attardait pas sur la localisation des ICU, mais plutôt sur le comportement thermique des éléments qui sont considérés « modifiables » et donc pouvant faire l'objet de mesures d'atténuation. C'est pour cette raison que nous ne sommes pas attardés aux facteurs reconnus dans la littérature scientifique favorisant les ICU tels que le *sky-view factor* et la chaleur anthropique puisque nous ne considérons pas que ces facteurs puissent être difficilement modifiés afin de diminuer leurs impacts sur le climat urbain via l'implantation de mesures d'atténuation.

À la lumière de nos analyses, il convient que la température de surface durant le jour est significativement distincte de celle durant la nuit de par l'intensité, la répartition, la localisation et les facteurs qui les influencent. Ainsi, il est adéquat d'affirmer que la stratégie d'implantation de mesures d'atténuation pour contrer la formation d'ICU ne peut reposer que sur un seul type d'aménagement, mais sur une pluralité de mesures d'atténuation afin de diminuer significativement la température de l'air durant le jour comme la nuit.

Considérant qu'il n'existe aucun réseau de stations météorologiques suivant les standards préétablis par l'Organisation Mondiale de Météorologie sur le territoire montréalais², il est difficile de déterminer avec exactitude le lien de causalité entre les îlots de chaleur de surface et les ICU de canopée. À elle seule, notre étude ne permet que l'identification hypothétique des infrastructures et les types de surface susceptible influencer la couche d'air à proximité du sol. Donc, il apparaît essentiel que pour les prochaines études ayant comme objectif de déterminer avec certitude les éléments du cadre bâti les plus problématiques, il serait primordial de comparer aux données aéroportées thermiques, des données de la température de l'air issu de diverses stations météorologiques miniatures. Celles-ci pourraient être installées au centre de différentes zones considérées comme étant des îlots de chaleur de surface par la présente étude.

Dès lors, il serait pertinent que d'autres études de ce genre soient réalisées afin, d'une part, de quantifier le lien entre la température de surface et la température de l'air à proximité du sol et, d'autre part, d'élaborer une méthode efficace de correction

² Il est intéressant de souligner l'existence du site web Wunderground.com qui rassemble un réseau mondiale de stations météorologiques mondiales établies et entretenues par des observateurs amateurs. Bien qu'il offre des informations météorologiques intéressantes pour les grandes métropoles du monde entier dont Montréal, cette source de données comporte quelques lacunes importantes soit l'absence d'information sur les conditions sur l'environnement immédiat et l'absence de paramètres standardisés sur l'installation des stations météorologiques. De ce fait, il est évident que ces données peuvent difficilement être utilisées dans le cadre de recherches scientifiques rigoureuses.

atmosphérique. Néanmoins, les images thermiques aéroportées sont des moyens efficaces pour démontrer l'ampleur des conséquences négatives de la perte du milieu naturel et de l'artificialisation des surfaces. Et surtout, elles s'avèrent des excellents outils pour sensibiliser autant le grand public, les élus que le milieu scientifique sur la problématique des îlots de chaleur.

BIBLIOGRAPHIE

- Actu-Environnement. (2012) *Dictionnaire environnement-mitigation*. Récupéré le 15 décembre 2013 de http://www.actu-environnement.com/ae/dictionnaire_environnement/definition/mitigation.php4
- Akbari, H., Shea Rose, L. et Taha, H. (2003). Analyzing the land cover of an urban environment using high-resolution orthophotos. *Landscape and Urban Planning*, 63(1), 1-14. doi: 10.1016/s0169-2046(02)00165-2
- Anniballe, R., Bonafoni, S. et Pichierri, M. (2014). Spatial and temporal trends of the surface and air heat island over Milan using MODIS data. *Remote Sensing of Environment*, 150, 163-171. doi: 10.1016/j.rse.2014.05.005
- Arnfield, A. J. (2003). Two decades of urban climate research: a review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. *International Journal of Climatology*, 23(1), 1-26. doi: 10.1002/joc.859
- ASSSM, Agence de la santé et des services sociaux de Montréal. (2011). Canicule 2010 à Montréal: Rapport du directeur de santé publique. p. 49.
- Ayanlade, A. (2016). Seasonality in the daytime and night-time intensity of land surface temperature in a tropical city area. *Science of The Total Environment*, 557-558, 415-424. doi: 10.1016/j.scitotenv.2016.03.027 Récupéré de <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/27017074>
- Bass, B. et Baskaran, B. (1999). *Evaluating rooftop and vertical gardens as an adaptation strategy for urban areas*. 106 p.
- Bergeron, O. et Strachan, I. B. (2012). Wintertime radiation and energy budget along an urbanization gradient in Montreal, Canada. *International Journal of Climatology*, 32(1), 137-152. doi: 10.1002/joc.2246
- Besancenot, J.-P. (2002). Vagues de chaleur et mortalité dans les grandes agglomérations urbaines. *Environnement, Risques & Santé*, 1(4), p. 229-240.
- Bokaie, M., Zarkesh, M. K., Arasteh, P. D. et Hosseini, A. (2016). Assessment of Urban Heat Island based on the relationship between land surface temperature

- and Land Use/ Land Cover in Tehran. *Sustainable Cities and Society*, 23, 94-104. doi: 10.1016/j.scs.2016.03.009
- Bowler, D. E., Buyung-Ali, L., Knight, T. M. et Pullin, A. S. (2010). Urban greening to cool towns and cities: A systematic review of the empirical evidence. *Landscape and Urban Planning*, 97(3), 147-155. doi: 10.1016/j.landurbplan.2010.05.006
- Bretz, S., Akbari, H. et Rosenfeld, A. (1998). Practical issues for using solar-reflective materials to mitigate urban heat islands. *Atmospheric Environment*, 32(1), 95-101
- Caloz, R. et Collet, C. (2001). *Précis de télédétection - Volume 3: Traitements numériques d'images de télédétection*. Sainte-Foy : Presses de l'Université du Québec.
- Cavayas, F. et Baudouin, Y. (2008). *Étude des biotopes urbains et périurbains de la CMM. Volets 1 et 2 : Évolution des occupations du sol, du couvert végétal et des îlots de chaleur sur le territoire de la Communauté métropolitaine de Montréal (1984-2005). Rapport destiné au CRÉ de Laval*.
- Chang, C.-R. et Li, M.-H. (2014). Effects of urban parks on the local urban thermal environment. *Urban Forestry & Urban Greening*, 13(4), 672-681. doi: 10.1016/j.ufug.2014.08.001
- Chen, J., Wang, H. et Zhu, H. (2017). Analytical approach for evaluating temperature field of thermal modified asphalt pavement and urban heat island effect. *Applied Thermal Engineering*, 113, 739-748. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2016.11.080
- Chow, W. T. L., Brennan, D. et Brazel, A. J. (2012). Urban Heat Island Research in Phoenix, Arizona: Theoretical Contributions and Policy Applications. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(4), 517-530. doi: 10.1175/bams-d-11-00011.1
- Coseo, P. et Larsen, L. (2014). How factors of land use/land cover, building configuration, and adjacent heat sources and sinks explain Urban Heat Islands in Chicago. *Landscape and Urban Planning*, 125, 117-129. doi: 10.1016/j.landurbplan.2014.02.019
- Coutts, A., Beringer, J. et Tapper, N. (2010). Changing Urban Climate and CO₂ Emissions: Implications for the Development of Policies for Sustainable Cities. *Urban Policy and Research*, 28(1), 27-47. doi: 10.1080/08111140903437716

- Environnement Canada (2012a) *Rapport de données horaires pour le 31 août 2012*. Récupéré le 15 octobre 2013 de http://climat.meteo.gc.ca/climate_data/hourly_data_f.html?timeframe=1&hlyRange=2008-01-08%7C2017-01-03&dlyRange=2002-12-23%7C2017-01-03&mlyRange=%7C&StationID=30165&Prov=QC&urlExtension=_f.html&searchType=stnName&optLimit=yearRange&StartYear=2012&EndYear=2012&selRowPerPage=25&Line=2&searchMethod=contains&txtStationName=montreal&Year=2012&Month=8&Day=31#
- Environnement Canada (2012b) *Rapport de données horaire du 02 septembre 2012*. Récupéré le 15 octobre 2013 de http://climat.meteo.gc.ca/climate_data/hourly_data_f.html?timeframe=1&Year=2012&Month=9&Day=2&hlyRange=2008-01-08%7C2017-01-03&dlyRange=2002-12-23%7C2017-01-03&mlyRange=%7C&StationID=30165&Prov=QC&urlExtension=_f.html&searchType=stnName&optLimit=yearRange&StartYear=2012&EndYear=2012&selRowPerPage=25&Line=2&searchMethod=contains&txtStationName=montreal
- Environnement Canada (2012c) *Rapport de données horaires pour le 01 septembre 2012*. Récupéré le 15 octobre 2013 de http://climat.meteo.gc.ca/climate_data/hourly_data_f.html?timeframe=1&Year=2012&Month=9&Day=1&hlyRange=2008-01-08%7C2017-01-03&dlyRange=2002-12-23%7C2017-01-03&mlyRange=%7C&StationID=30165&Prov=QC&urlExtension=_f.html&searchType=stnName&optLimit=yearRange&StartYear=2012&EndYear=2012&selRowPerPage=25&Line=2&searchMethod=contains&txtStationName=montreal
- EPA, U.S. Environmental Protection Agency (2008). *Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies - Heat Island Reduction Activities*. : Récupéré de <https://www.epa.gov/sites/production/files/2014-06/documents/basicscompendium.pdf>.
- Feyisa, G. L., Dons, K. et Meilby, H. (2014). Efficiency of parks in mitigating urban heat island effect: An example from Addis Ababa. *Landscape and Urban Planning*, 123, 87-95. doi: 10.1016/j.landurbplan.2013.12.008
- Gallo, K. P., Tarpley, J. D., McNab, A. L. et Karl, T. R. (1995). Assessment of urban heat islands: a satellite perspective. *Atmospheric Research*, 37(1-3), 37-43. doi: 10.1016/0169-8095(94)00066-m

- GIEC, Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (2008). *Changements climatiques 2007: Rapport de synthèse*. 102 p.
- Hamada, S. et Ohta, T. (2010). Seasonal variations in the cooling effect of urban green areas on surrounding urban areas. *Urban Forestry & Urban Greening*, 9(1), 15-24. doi: 10.1016/j.ufug.2009.10.002
- Heinl, M., Hammerle, A., Tappeiner, U. et Leitinger, G. (2015). Determinants of urban-rural land surface temperature differences – A landscape scale perspective. *Landscape and Urban Planning*, 134, 33-42. doi: 10.1016/j.landurbplan.2014.10.003
- Homayouni, S. (2005). *Caractérisation des scènes urbaines par analyse des images hyperspectrales*. École nationale supérieure des télécommunications. Thèse de doctorat. 139 p.
- Ichinose, T., Shimodozono, K. et Hanaki, K. (1999). Impact of anthropogenic heat on urban climate in Tokyo. *Atmospheric Environment*, 33(24-25), 3897-3909. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S1352-2310\(99\)00132-6](http://dx.doi.org/10.1016/S1352-2310(99)00132-6) Récupéré de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231099001326>
- INSERM, Institut national de la santé et de la recherche médicale (2004). *Surmortalité liée à la canicule d'août 2003 - Suivi de la mortalité (21 août - 31 décembre 2003)*. 42 p.
- ISQ, Institut de la statistique du Québec (2012). *Population et structure par âge et sexe*. Récupéré le 11 décembre 2014 de <http://www.stat.gouv.qc.ca/docs-hmi/statistiques/population-demographie/structure/index.html>
- ITRES. (2010a) *CASI-1500: Visible Near Infrared Imager*. Récupéré le 15 décembre 2013 de: <http://www.itres.com/casi-1500/#specs>
- ITRES. (2010b) *TABI-1800 Thermal Airbone Broadband Imager*. Récupéré le 15 décembre 2013 de: <http://www.itres.com/tabi-1800/#specs>
- Jacquet, S. (2010). *Étude de la performance énergétique d'une toiture végétale extensive installée au centre-ville de Montréal*. École de technologie supérieure. mémoire de maîtrise.
- Kim, Y.-H. et Baik, J.-J. (2005). Spatial and Temporal Structure of the Urban Heat Island in Seoul. *American Meteorological Society*, 44, 591-605.
- Lachance, G. (2005). *Prototype d'évaluation de la dynamique entre l'intensité thermique esivale, la population et les composantes du tissu urbain en milieu résidentiel à Montréal*. Université du Québec à Montréal, Montréal. Mémoire de maîtrise.

- Lagouarde, J.-P., Moreau, P., Irvine, M., Bonnefond, J.-M., Voogt, J. A. et Sollicec, F. (2004). Airborne experimental measurements of the angular variations in surface temperature over urban areas: case study of Marseille (France). *Remote Sensing of Environment*, 93(4), 443-462. doi: 10.1016/j.rse.2003.12.011
- Lareau Carpentier, F. (2012). *Évaluation et cartographie de la vulnérabilité à la chaleur dans l'agglomération de Montréal*. Université du Québec à Montréal, Montréal. Mémoire de maîtrise.
- Leprince, J. (2008). *Analyse des îlots de chaleur, de la dynamique thermique et végétale, ainsi que des mesures de mitigation associées, aux campus de l'Université McGill*. Université du Québec à Montréal, Montréal. Mémoire de maîtrise.
- Li, D. et Bou-Zeid, E. (2013). Synergistic Interactions between Urban Heat Islands and Heat Waves: The Impact in Cities Is Larger than the Sum of Its Parts*. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 52(9), 2051-2064. doi: 10.1175/jamc-d-13-02.1
- Li, X., Zhou, W. et Ouyang, Z. (2013). Relationship between land surface temperature and spatial pattern of greenspace: What are the effects of spatial resolution? *Landscape and Urban Planning*, 114, 1-8. doi: 10.1016/j.landurbplan.2013.02.005
- Lo, C. P., Quattrochi, D. A. et Luvall, J. C. (1997). Application of high-resolution thermal infrared remote sensing and GIS to assess the urban heat island effect. *International Journal of Remote Sensing*, 18(2), 287-304. doi: 10.1080/014311697219079
- MAMROT, Ministère des affaires municipales et Occupation du territoire du Québec (2013) *Communauté métropolitaine de Montréal*. Récupéré le 20 octobre 2014 de <http://www.mamrot.gouv.qc.ca/organisation-municipale/cartotheque/cartes-regionales/>
- Martin, P. (2008). *Analyse diachronique du comportement thermique de Montréal en période estivale de 1984 à 2005*. Université du Québec à Montréal, Montréal. <http://www.archipel.uqam.ca/1290/>. Mémoire de maîtrise.
- Météomédia. (2012) *Archives météo : Montréal, Québec*. Récupéré le 15 octobre 2013 de <http://past.meteomedia.com/index.php?product=historical&placecode=caqc0363>
- Mills, G. (2008). Luke Howard and The Climate of London. *Weather*, 63(6), 153 - 157.

- Numez, M. et Oke, T. R. (1977). The energy balance of an urban canyon. *Journal of applied meteorology*, 16, 11-19 p.
- Offerle, B., Grimmond, C. S. B. et Fortuniak, K. (2005). Heat storage and anthropogenic heat flux in relation to the energy balance of a central European city centre. *International Journal of Climatology*, 25(10), 1405-1419. doi: 10.1002/joc.1198
- Oke, T. R. (1970). The temperature profile near the ground on calm clear nights. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 96(407), 14-23. doi: 10.1002/qj.49709640703
- Oke, T. R. (1976). The distinction between canopy and boundary-layer urban heat islands. *Atmosphere*, 14(4), 268-277. doi: 10.1080/00046973.1976.9648422
- Oke, T. R. (1981). Canyon geometry and the nocturnal urban heat island; comparison of scale model and field observation. *Journal of climatology*, 1, 237-254p.
- Oke, T. R. (1987). *Boundary layer climates*. New York : Methuen & Co.
- Oke, T. R. et East, C. (1971). The urban boundary layer in Montreal. *Boundary-Layer Meteorology*, 1(4). doi: 10.1007/bf00184781
- Oke, T. R. et Fuggle, R. F. (1972). Comparison of urban/rural counter and net radiation at night. *Boundary-Layer Meteorology*, 2(3), 290-308. doi: 10.1007/bf02184771
- Oke, T. R., Johnson, G. T., Steyn, D. G. et Watson, I. D. (1991). Simulation of surface urban heat islands under "ideal" conditions at night part 2: Diagnosis of causation. *Boundary-Layer Meteorology*, 56(4), 339-358. doi: 10.1007/bf00119211
- Oke, T. R. et Maxwell, G. B. (1975). Urban heat island dynamics in Montréal and Vancouver. *Atmospheric Environment*, 9(2), 191-200.
- OURANOS. (2006). *Projet - MENV-7: Homogénéisation des séries de températures et analyse de la variabilité spatio-temporelle de ces séries au Québec méridional*.
- Pipia, L., Pérez, F., Tardà, A., Palà, V. et Arbiol, R. (2011). Potentials of the Thermal Airborne Spectrographic Imager for Environmental Studies.
- Pisello, A. L., Castaldo, V. L., Pignatta, G., Cotana, F. et Santamouris, M. (2016). Experimental in-lab and in-field analysis of waterproof membranes for cool roof application and urban heat island mitigation. *Energy and Buildings*, 114, 180-190. doi: 10.1016/j.enbuild.2015.05.026

- Projet-Montréal. (2012) *Lutte aux îlots de chaleur - Aménagement de vingt-et-une ruelles vertes dans Rosemont-La Petite-Patrie*. Récupéré le 15 décembre 2013 de <http://projetmontreal.org/communiqués/lutte-aux-ilots-de-chaleur-amenagement-de-vingt-et-une-ruelles-vertes-dans-rosemont-la-petite-patrie/>
- Provencher, L. et M. Dubois, J.-M. (2007). *Précis de télédétection - Volume 4. Méthodes de photointerprétation et d'interprétation d'image*. (Vol. 4). Québec : Presses de l'Université du Québec.
- Qin, Y. et Hiller, J. E. (2014). Understanding pavement-surface energy balance and its implications on cool pavement development. *Energy and Buildings*, 85, 389-399. doi: 10.1016/j.enbuild.2014.09.076
- Ressources naturelles Canada (2013) *Classification et analyse des images*. . Récupéré le 15 mars 2016 de <http://www.rncan.gc.ca/sciences-terre/geomatique/imagerie-satellitaire-photos-aeriennes/imagerie-satellitaire-produits/ressources-educatives/9362>
- Rizwan, A. M., Dennis , L. Y. C. et Liu, C. (2008). A review on the generation, determination and mitigation of Urban Heat Island. *Journal of Environmental Sciences*, 20(1), 120-128. doi: 10.1016/S1001-0742(08)60019-4
- Rosenzweig, C., Solecki, W. D., Cox, J., Hodges, S., Parshall, L., Lynn, B., Goldberg, R., Gaffin, S., Slosberg, R. B., Savio, P., Watson, M. et Dunstan, F. (2009). Mitigating New York City's Heat Island: Integrating Stakeholder Perspectives and Scientific Evaluation. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 90(9), 1297-1312. doi: 10.1175/2009bams2308.1
- Saaroni, H., Ben-Dor, E., Bitan, A. et Potchter, O. (2000). Spatial distribution and microscale characteristics of the urban heat island in Tel-aviv, Israel. *Landscape and Urban Planning*, 48, 1-18. doi: 10.1016/S0169-2046(99)00075-4
- Santamouris, M., Synnefa, A. et Karlessi, T. (2011). Using advanced cool materials in the urban built environment to mitigate heat islands and improve thermal comfort conditions. *Solar Energy*, 85(12), 3085-3102. doi: 10.1016/j.solener.2010.12.023
- Savelyev, A. et Sugumaran, R. (2008). Surface Temperature Mapping of the University of Northern Iowa Campus Using High Resolution Thermal Infrared Aerial Imagery. *Sensors*, 8(8), 5055-5068. doi: 10.3390/s8085055
- Schrijvers, P. J. C., Jonker, H. J. J., Kenjereš, S. et de Roode, S. R. (2015). Breakdown of the night time urban heat island energy budget. *Building and Environment*, 83, 50-64. doi: 10.1016/j.buildenv.2014.08.012

- Sebari, I. et Morin, D. (2010). Développement et défis de la télédétection urbaine. *Cahiers de géographie du Québec*, 54(151), 117. doi: 10.7202/044369ar
- Shashua Bar, L. et Hoffman, M. E. (2000). Vegetation as a climatic component in the design of an urban street. *Energy and Buildings*, 31(3), 221-235. doi: 10.1016/s0378-7788(99)00018-3
- Shashua Bar, L. et Hoffman, M. E. (2003). Geometry and orientation aspects in passive cooling of canyon streets with trees. *Energy and Buildings*, 35(1), 61-68. doi: 10.1016/s0378-7788(02)00080-4
- Skelhorn, C., Lindley, S. et Levermore, G. (2014). The impact of vegetation types on air and surface temperatures in a temperate city: A fine scale assessment in Manchester, UK. *Landscape and Urban Planning*, 121, 129-140. doi: 10.1016/j.landurbplan.2013.09.012
- Synnefa, A., Santamouris, M. et Livada, I. (2006). A study of the thermal performance of reflective coatings for the urban environment. *Solar Energy*, 80(8), 968-981. doi: 10.1016/j.solener.2005.08.005
- Taha, H. (1997). Urban climates and heat islands : albedo, evapotranspiration and anthropogenic heat. *Energy and Buildings*, 25, 99-103.
- Takebayashi, H. et Moriyama, M. (2007). Surface heat budget on green roof and high reflection roof for mitigation of urban heat island. *Building and Environment*, 42(8), 2971-2979. doi: 10.1016/j.buildenv.2006.06.017
- USGS, United States Geological Survey (2012). *Landsat 5 History*. Récupéré le 10 octobre 2014 de: http://landsat.usgs.gov/about_landsat5.php
- Ville de Montréal (2004). *L'édition 2011 de l'annuaire statistique de l'agglomération de Montréal*. Récupéré le 10 octobre 2013 de http://ville.montreal.qc.ca/pls/portal/docs/page/arrond_mhm_fr/media/documents/plan_urbanisme_vdm_2004_chapitre_mhm.pdf
- Ville de Montréal (2013). *L'édition 2011 de l'annuaire statistique de l'agglomération de Montréal*. Récupéré le 10 octobre 2013 de http://ville.montreal.qc.ca/pls/portal/docs/PAGE/MTL_STATS_FR/MEDIA/DOCUMENTS/ANNUAIRE%20STATISTIQUE_2011_RECENSEMENT%20ET%20ENM.PDF
- Ville de Montréal (2014). *Profil sociodémographique- Arrondissement de Mercier-Hochelaga-Maisonneuve*. 42 p.

- Voogt, J. A. (2004). *Urban Heat Island: Hotter Cities*. Récupéré le 29 novembre 2014 de <http://www.actionbioscience.org/environment/voogt.html>
- Voogt, J. A. et Oke, T. R. (2003). Thermal remote sensing of urban climates. *Remote Sensing of Environment*, 86(3), 370-384. doi: 10.1016/s0034-4257(03)00079-8
- Walker, J. J., de Beurs, K. M. et Henebry, G. M. (2015). Land surface phenology along urban to rural gradients in the U.S. Great Plains. *Remote Sensing of Environment*, 165, 42-52. doi: 10.1016/j.rse.2015.04.019
- Wang, H., Xiao, Q., Li, H. et Zhong, B. (2011). Temperature and emissivity separation algorithm for TASI airborne thermal hyperspectral data. 1075-1078. doi: 10.1109/icecc.2011.6066288
- Wang, Y. et Akbari, H. (2016). Analysis of urban heat island phenomenon and mitigation solutions evaluation for Montreal. *Sustainable Cities and Society*, 26, 438-446. doi: 10.1016/j.scs.2016.04.015
- Weng, Q., Lu, D. et Schubring, J. (2004). Estimation of land surface temperature-vegetation abundance relationship for urban heat island studies. *Remote Sensing of Environment*, 89(4), 467-483. doi: 10.1016/j.rse.2003.11.005
- Xiao, R.-B., Ouyang, Z.-Y., Zheng, H., Li, W.-F., Schienke, E. W. et Wang, X.-K. (2007). Spatial pattern of impervious surfaces and their impacts on land surface temperature in Beijing, China. *Journal of Environmental Sciences*, 19(2), 250-256. doi: 10.1016/s1001-0742(07)60041-2
- Yang, J., Wang, Z.-H. et Kaloush, K. E. (2015). Environmental impacts of reflective materials: Is high albedo a 'silver bullet' for mitigating urban heat island? *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 47, 830-843. doi: 10.1016/j.rser.2015.03.092
- Yang, J., Wang, Z.-H., Kaloush, K. E. et Dylla, H. (2016). Effect of pavement thermal properties on mitigating urban heat islands: A multi-scale modeling case study in Phoenix. *Building and Environment*, 108, 110-121. doi: 10.1016/j.buildenv.2016.08.021
- Yap, D. et Oke, T. R. (1974). Sensible heat fluxes over an urban area- Vancouver, B.C. *Journal of applied meteorology*, 13, 880-890 p.
- Yuan, F. et Bauer, M. E. (2007). Comparison of impervious surface area and normalized difference vegetation index as indicators of surface urban heat island effects in Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment*, 106(3), 375-386. doi: 10.1016/j.rse.2006.09.003

Zhang, Y., Yiyun, C., Qing, D. et Jiang, P. (2012). Study on Urban Heat Island Effect Based on Normalized Difference Vegetated Index:A Case Study of Wuhan City. *Procedia Environmental Sciences*, 13, 574-581. doi: 10.1016/j.proenv.2012.01.048